H. v. Helmholtz

Die Lehre von den Tonempfindungen



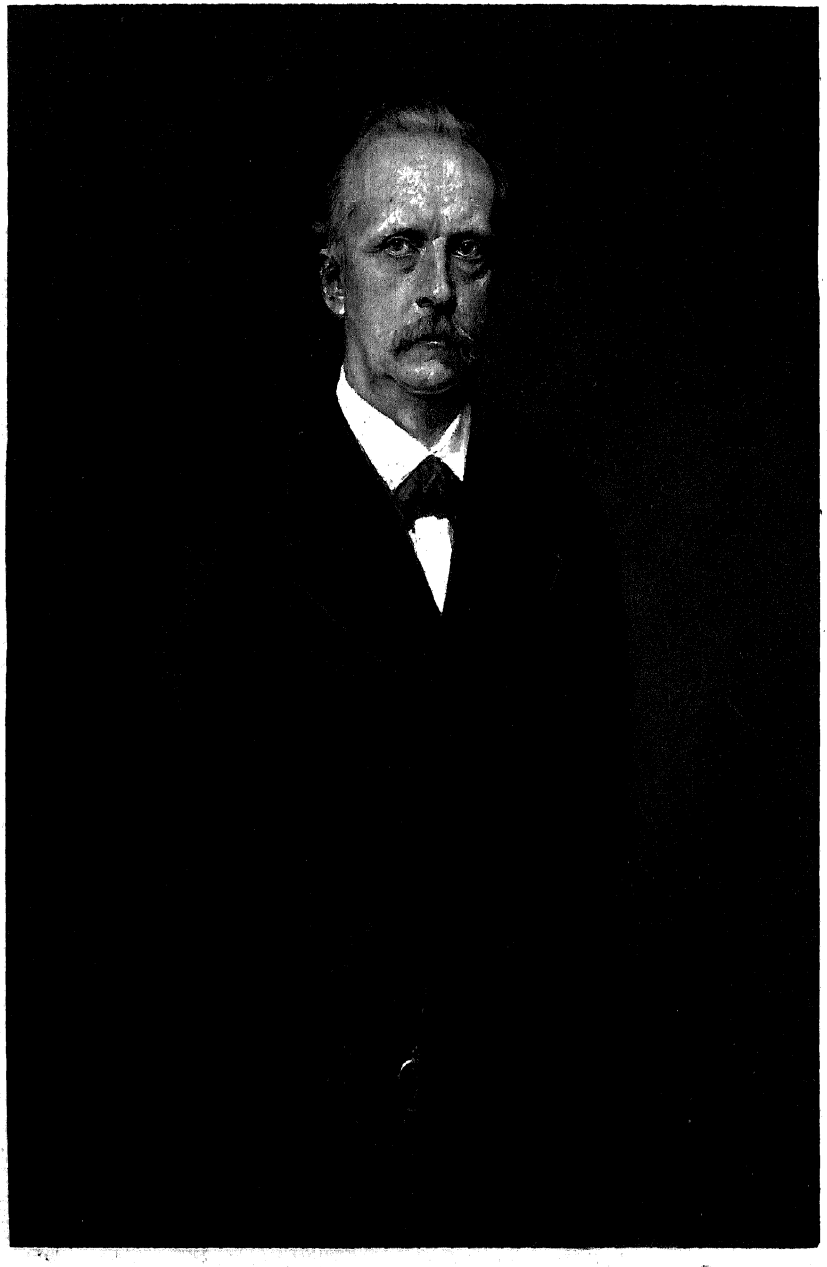
DIE LEHRE

VON DEN

TONEMPFINDUNGEN

ALS PHYSIOLOGISCHE GRUNDLAGE FÜR DIE

THEORIE DER MUSIK



H. v. Helmholtz

DIE LEHRE

VON DEN

TONEMPFINDUNGEN

ALS PHYSIOLOGISCHE GRUNDLAGE FÜR DIE THEORIE DER MUSIK

VON

HERMANN VON HELMHOLTZ

SECHSTE AUSGABE

MIT DEM BILDNIS DES VERFASSERS UND 66 ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDR. VIEWEG & SOHN

1913

Alle Rechte,
namentlich das Recht der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright, 1913, by Friedr. Vieweg & Sohn,
Braunschweig, Germany.

VORREDE ZUR ERSTEN AUSGABE.

Indem ich die Früchte achtjähriger Arbeit der Öffentlichkeit übergebe, habe ich zugleich noch eine Pflicht der Dankbarkeit zu erfüllen. Die vorliegenden Untersuchungen erforderten zu ihrer Vollendung die Beschaffung von neuen Instrumenten, welche nicht wohl für das Inventarium eines physiologischen Instituts paßten, und deren Kosten die gewöhnlichen Hilfsmittel eines deutschen Gelehrten überstiegen. Mir sind die Geldmittel dazu durch außergewöhnliche Bewilligungen zugeflossen. Den auf S. 196 bis 199 beschriebenen Apparat zur künstlichen Zusammensetzung der Vokalklänge ausführen zu lassen, machte mir die Munifizenz Sr. Majestät des Königs Maximilian von Bayern möglich, welchem die deutsche Wissenschaft schon in so vielen ihrer Felder die bereitwilligste Teilnahme und Förderung verdankt. Für die Erbauung des Harmoniums in natürlicher reiner Stimmung, welches S. 512 beschrieben ist, diente mir der Soemmeringsche Preis, den mir die Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft zu Frankfurt a. M. bewilligte. Indem ich hier öffentlich den Ausdruck meines Dankes für solche Unterstützung meiner Untersuchungen wiederhole, hoffe ich, daß noch besser als Dankesworte der Verlauf der vorliegenden Untersuchungen zeigen möge, wie ich ernstlich bemüht gewesen bin, die mir gewährten Hilfsmittel fruchtbar zu verwerten.

Heidelberg, im Oktober 1862.

H. Helmholtz.

VORWORT ZUR DRITTEN AUSGABE.

Die vorliegende dritte Ausgabe hat einige stärkere Veränderungen erfahren, als die frühere. Namentlich konnte ich im sechsten Abschnitt die neueren Arbeiten über Physiologie und Anatomie des Ohres benutzen. Hiernach mußte einmal die Beurteilung der Leistungen der Cortischen Bögen eine Abänderung erfahren, und zweitens

erscheint die eigentümliche Gelenkverbindung zwischen Hammer und Amboß als Ursache, daß im Ohr selbst zu stärkeren einfachen Tönen leicht harmonische Obertöne entstehen. Diese besondere Reihe der Obertöne, auf deren Existenz die hier gegebene Theorie der Musik wesentlich gegründet ist, erhält daher noch eine von den äußeren Abänderungen der Klangfarbe unabhängige subjektive Wichtigkeit. Zur Erläuterung der anatomischen Verhältnisse ist auch eine Reihe neuer Holzschnitte eingefügt, meistens dem Handbuch der Anatomie von Henle entnommen mit Bewilligung des Autors, wofür ich diesem hier noch öffentlich meinen Dank wiederhole.

Ferner habe ich die Abschnitte über Geschichte der Musik stark umgearbeitet und, wie ich hoffe, in besseren Zusammenhang gebracht. Ich bitte übrigens, diesen Abschnitt nur als eine Kompilation aus sekundären Quellen zu betrachten; zu Originalstudien in diesem überaus schwierigen Felde hätte ich weder die Zeit noch die Vorkenntnisse gehabt. Die ältere Geschichte der Musik bis auf die Anfänge des Diskantus ist fast nur ein ungeordnetes Haufwerk von Nebendingen, während wir über die Hauptsachen nur Hypothesen aufstellen können. Indessen muß natürlich jede Theorie der Musik versuchen, Zusammenhang in dieses Chaos zu bringen, und immerhin findet sich eine Anzahl wichtiger Tatsachen darin vor.

In der Bezeichnung der Tonhöhen nach natürlicher Stimmung habe ich die ursprünglich von Hauptmann vorgeschlagene Methode verlassen, die für verwickeltere Verhältnisse nicht übersichtlich genug blieb, und dafür mich dem System von Herrn A. v. Oettingen angeschlossen, wie es auch schon in der französischen Übersetzung dieses Buches von Herrn G. Guéroult geschehen war.

[Es folgen Angaben über die Zusätze der neuen Auflage.]

Darf ich mir schließlich noch einige Bemerkungen erlauben über die Aufnahme, welche die in diesem Buche vorgetragene Theorie der Musik gefunden hat, so haben sich die in dieser Beziehung veröffentlichten Gegenbemerkungen fast ausschließlich an die Theorie der Konsonanz geheftet, als wenn diese der wesentliche Kern der Sache wäre. Die einen, welche mechanische Erklärungen bevorzugen, haben ihr Bedauern ausgesprochen, daß ich überhaupt in diesem Gebiete der künstlerischen Erfindung und den ästhetischen Neigungen des menschlichen Geistes noch einen Spielraum gelassen habe, und haben auch wohl versucht, durch neue Zahlenspekulationen mein System zu ergänzen. Andere Kritiker von mehr metaphysischen Neigungen

haben meine Theorie der Konsonanz und damit, wie sie glaubten, meine ganze Theorie der Musik als zu grob mechanisch verworfen.

Meine Kritiker mögen mir verzeihen, wenn ich aus dem Widerstreit ihrer Vorwürfe schließe, daß ich ungefähr den richtigen Weg gegangen bin. Für meine Theorie der Konsonanz muß ich in Anspruch nehmen, daß sie, abgesehen von der übrigens ganz entbehrlichen Hypothese über die Leistungen der Schnecke im Ohr, bloß eine Zusammenfassung beobachtbarer Tatsachen ist. Aber ich halte es für einen Fehler, wenn man die Theorie der Konsonanz zur wesentlichen Grundlage der Theorie der Musik macht, und ich war der Meinung, dies deutlich genug in diesem Buche ausgesprochen zu haben. Die wesentliche Basis der Musik ist die Melodie. Die Harmonie ist in der westeuropäischen Musik der letzten drei Jahrhunderte ein wesentliches und unserem Geschmack unentbehrliches Verstärkungsmittel der melodischen Verwandtschaften geworden, aber es hat Jahrtausende lang fein ausgebildete Musik ohne Harmonie gegeben, und gibt noch jetzt solche bei den außereuropäischen Völkern. Und ich muß meinen metaphysisch-ästhetischen Gegnern antworten, daß ich nicht glaube, in der Theorie der melodischen Bildungen die künstlerischen Triebe des menschlichen Geistes zu gering angeschlagen zu haben, wenn ich auch versucht habe, die physiologischen Tatsachen nachzuweisen, welche dem ästhetischen Gefühl einen Angriffspunkt gewähren. Denjenigen aber, denen ich nicht weit genug in meinen naturwissenschaftlichen Erklärungen gegangen zu sein scheine, erwidere ich, daß erstens überhaupt der Naturforscher sich nicht verpflichtet fühlt, vollständige Systeme über alles, was er weiß und was er nicht weiß, aufzustellen; und zweitens, daß ich eine Theorie, welche sämtliche Gesetze des modernen Generalbasses als Naturnotwendigkeiten nachgewiesen zu haben glaubte, schon für gerichtet halten würde, weil sie zu viel erwiesen hätte.

Bei Musikern hat meine Charakterisierung des Mollgeschlechts am meisten Anstoß erregt. Ich muß mich ihnen gegenüber auf die leicht zugänglichen Aktenstücke, die Kompositionen, welche in die Entwickelungszeit des modernen Moll von 1500 bis 1750 fallen, berufen. Da kann man sich überzeugen, wie langsam und schwankend es sich entwickelt hat, und wie die letzten Spuren seiner Unfertigkeit sich noch bei Sebastian Bach und Händel finden.

Heidelberg, im Mai 1870.

H. Helmholtz.

VORWORT ZUR VIERTEN AUSGABE.

In der prinzipiellen Auffassung der musikalischen Verhältnisse habe ich auch in der neuen Auflage nichts ändern zu müssen geglaubt. Ich kann in dieser Beziehung nur das festhalten, was in den betreffenden Abschnitten des Buches und in dem Vorwort zur dritten Ausgabe gesagt ist. Im einzelnen dagegen ist manches umgearbeitet und erweitert worden. [Zur Orientierung für Leser früherer Auflagen folgt ein Verzeichnis der Änderungen und Zusätze.]

Berlin, im April 1877.

H. Helmholtz.

VORWORT ZUR FÜNFTEN AUSGABE.

Die gegenwärtige Ausgabe ist ein fast unveränderter Abdruck der vorigen. Kleine Zusätze des Herausgebers sind durch eckige Klammern kenntlich gemacht. In dem mathematischen Anhange sind nach Möglichkeit die einmal gewählten Bezeichnungen durchgeführt. Bei den Zitaten aus Arbeiten des Verfassers wurde auf die betreffende Stelle in den „Gesammelten wissenschaftlichen Abhandlungen“ hingewiesen.

Jede Ergänzung des Inhaltes der „Tonempfindungen“ durch Aufnahme der Ergebnisse neuerer Forschungen unterblieb gemäß einer letzten Willensäußerung des Verewigten.

Freilich hat die Wissenschaft neuerdings in mehreren hier in Betracht kommenden Einzelfragen bedeutende Fortschritte gemacht, und speziell hat sich durch die zunehmende Vervollkommnung des Mikroskopes unsere Kenntnis von dem Bau des Ohres und den Nervenendungen im Cortischen Organ nicht unbeträchtlich erweitert.

Die Aufnahme dieser Änderungen hätte jedoch den Umsturz großer Teile des alten Textes erfordert. Eine solche Umgestaltung seiner Arbeit hätte aber nur der Meister selbst geben dürfen. Werke, die so tief, wie das vorliegende, in die Geschichte der Wissenschaft eingeschnitten und nach den verschiedensten Seiten hin epochemachend gewirkt haben, tragen in sich das Recht, als hehre historische Denkmale in ihrer ursprünglichen Form bewahrt zu werden.

Außerdem aber vermögen alle diese Fortschritte höchstens manche Einzelheiten der Darstellung zu modifizieren, doch ändern sie in keiner Weise die großen grundlegenden Theorien über die Reizung der Nerven und die Übertragung des Schalles und den ganzen herrlichen Aufbau einer physikalischen Theorie des Klanges.

Berlin, im Dezember 1895.

R. Wachsmuth.

VORWORT ZUR SECHSTEN AUSGABE.

Volle fünfzig Jahre sind verflossen, seit die „Lehre von den Tonempfindungen" zum ersten Male erschien, und immer noch ist die Nachfrage nach dem Werke groß. So wurde eine sechste Auflage nötig. Sie ist, wie die vorhergehende, ein nahezu unveränderter Abdruck der vierten, welche Hermann v. Helmholtz noch selbst durchsehen und ergänzen konnte. Für die fünfte Auflage war es sein Wunsch, daß sie ohne Zusätze herauszugeben sei. Sollte man diesmal, nach so langer Zeit, die Erweiterung unserer Kenntnisse nachtragen? Nach sorgsamer Erwägung wurde der Plan aufgegeben. Die Schönheit des Werkes und die Einheitlichkeit der Darstellung hätten darunter gelitten.

An Lehrbüchern auf den Einzelgebieten ist kein Mangel. Für die physikalische Akustik sei nur etwa auf die Werke von F. Auerbach[1]), von L. Pfaundler[2]), von Chwolson[3]) hingewiesen. Die physiologischen Teile findet man in Nagels Handbuch der Physiologie des Menschen[4]) von K. L. Schäfer trefflich dargestellt.

Über die Psychologie des Tongebietes orientiert man sich wohl am besten in Carl Stumpfs Tonpsychologie[5]). Doch wird gerade von Psychologen gegenwärtig ganz außerordentlich viel akustisch gearbeitet. — Die musikgeschichtlichen und musikästhetischen Teile haben noch keine neue Bearbeitung gefunden. Das größere Werk eines Fachmannes in musikhistorischen und ethnologischen Fragen ist erst in Vorbereitung.

---

[1]) Winkelmanns Handb. d. Physik, 2. Aufl., Bd. 2, Leipzig 1909. — [2]) Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik, 10. Aufl., Braunschweig 1906. — [3]) Deutsche Übersetzung H. Pflaum, Bd. 2, Braunschweig 1904. — [4]) Braunschweig 1908. — [5]) 2 Bde., Leipzig 1883 und 1890.

Die „Lehre von den Tonempfindungen“ ist mehrfach in fremde Sprachen übertragen worden, teils gekürzt (vgl. S. 9), teils vollinhaltlich. Die französische Übersetzung von G. Guéroult wurde bereits im Vorwort zur dritten Auflage erwähnt. Die englische Übertragung von Alexander J. Ellis (2. Aufl., London 1885) ist dem Gebrauch von Musikstudierenden angepaßt und daher durch viele Erklärungen und Zusätze erweitert.

Man wird die Frage aufwerfen, in welcher Richtung Änderungen der Anschauungsweise sich vollzogen, und wo andererseits unsichere Annahmen sich bestätigt haben. Da läßt sich zunächst ganz allgemein sagen, daß die großen Grundanschauungen der Helmholtzschen Lehre auch heute noch unentbehrlich, daß aber im einzelnen mancherlei Änderungen und Ergänzungen notwendig geworden sind. „Helmholtz selbst hat viele Fragen aus der Theorie des Hörens ausdrücklich offen gelassen, weil die experimentellen Grundlagen für ihre Beantwortung noch fehlten[1].“ Solches Beobachtungsmaterial ist in reichem Maße gesammelt, und es soll hier auf einige wichtigere Punkte hingewiesen werden.

Vor allem strebt man danach festzustellen, welche Erscheinungen in der Empfindungswelt durch die physikalischen Ursachen ausgelöst werden.

Zu den beiden physikalischen Eigenschaften eines einfachen Tones, seiner Stärke und seiner Tonhöhe, wurde von C. Stumpf[2] noch eine psychologische, die „Tonfarbe“, hinzugefügt. Es ist diese eine Eigenschaft, die nicht dem aussendenden Körper zukommt, sondern in dem empfangenden Resonatorensystem des Ohres, vielleicht in der für verschiedene Höhen sich ändernden Dämpfungsgröße seine Ursache hat.

Auch der Einfluß der Phase auf den Klang ist von mehreren Seiten genau geprüft worden. Sowohl der Physiologe L. Hermann[3], wie der Physiker F. Lindig[4] und neuerdings Lasareff[5] haben einwandfrei festgestellt, daß die Farbe eines Klanges durch eine Phasenverschiebung seiner Komponenten sich nicht ändert.

Was schließlich die Charakterisierung der Vokale durch bestimmte im Tonsystem feststehende Töne betrifft [L. Hermann[6]) hat ihnen den Namen „Formanten“ gegeben], so hat sich diese vollständig

[1]) E. Wätzmann, Die Resonanztheorie des Hörens. Braunschweig 1912. — [2]) Tonpsychologie, Bd. I. — [3]) Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. 56, 1894. — [4]) Ann. d. Phys. 10, 1902. — [5]) Zeitschr. f. Sinnesphysiol. 45, 1911. — [6]) Phonophotogr. Untersuchungen. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie.

bestätigt, nur hat die Bestimmung ihrer absoluten Höhe eine kleine Änderung erfahren. Köhler[1]) hat gezeigt, daß die reinen Vokale sich genau in Oktavenabstand befinden, und daß auch durch Angeben der betreffenden einfachen Töne die entsprechende Vokalempfindung entsteht. Dagegen sind über die spezielle Frage, ob die Formanten erst durch Anblasen der Mundhöhle entstehen (Hermann), oder bereits vorher als Teiltöne im Kehlkopfklang (Helmholtz-Pipping) enthalten sind, die Meinungen noch geteilt. Noch nicht mit Sicherheit geklärt ist ferner die Frage, ob man auch für den Klang von Instrumenten bestimmte Formanten annehmen muß, wie Untersuchungen von F. Meißner[2]) und von E. Herrmann-Goldap[3]) es wahrscheinlich machen.

Von Max Wien[4]) ist die verschiedene Empfindlichkeit des Ohres für Töne verschiedener Höhe geprüft worden. Die Empfindlichkeit zeigte ein Maximum bei etwa 2000 Schwingungen. Hier ist sie etwa hundertmillionenmal so groß wie bei 25 Schwingungen. Dann nimmt die Empfindlichkeit wieder ab.

Die obere Hörgrenze liegt nach vielfachen Beobachtungen von F. A. Schulze[5]) bei rund 20000 Schwingungen.

Über das Auftreten von Kombinationstönen hat Stumpf[6]) eine sehr genaue und ins einzelne gehende Untersuchung angestellt.

Die Helmholtzsche Theorie der Konsonanz und Dissonanz glaubte Stumpf[7]) verwerfen und an ihre Stelle seine „Verschmelzungstheorie" setzen zu müssen. Krüger[8]) hat versucht, die Einwendungen zu entkräften, indem er die Differenztöne zur Erklärung der Konsonanzen heranzog.

Eine kurze Zusammenstellung der physiologisch-anatomischen Untersuchungen findet man in dem oben erwähnten Buche von Wätzmann. Im übrigen sei auf das Nagelsche Handbuch hingewiesen. Ferner findet man viele Einzelheiten in der „Physiologie der Stimme und Sprache" von H. Gutzmann (Braunschweig 1909).

Die musikgeschichtliche Zusammenstellung über homophone, polyphone und harmonische Musik hält der neueren Forschung nicht mehr stand und weist eine Reihe von inzwischen widerlegten An-

---

[1]) Zeitschr. f. Psychol. **54**, 1909 und **55**, 1910. — [2]) Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **116**, 1907. — [3]) Festschrift für L. Hermann 1908. — [4]) Arch. f. d. ges. Physiol. **92**, 1903. — [5]) Ann. d. Phys. **24**, 1907 und Beiträge zur Anatomie usw. des Ohres usw., herausgeg. v. Passow u. Schäfer. Daselbst auch Zusammenstellung der einschläg. Literatur. — [6]) Zeitschr. f. Psychol. **55**, 1910. — [7]) Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft, 1. Heft, 1898. — [8]) Arch. f. d. ges. Psychol. **1**, 1903 und **2**, 1904.

gaben auf; so über die Verwendung der Lyra bei der griechischen Tragödie, über das Organum der polyphonen Musik usw. Insbesondere haben unsere Anschauungen über mittelalterliche Musik eine wesentliche Änderung erfahren unter dem Einflusse einer reichhaltigen Literatur neu aufgefundener Gesänge mit Instrumentalbegleitung aus der italienischen Frührenaissance.

Die Darstellung der Musiktheorie wäre vor allem durch Berücksichtigung neuerer Arbeiten Riemanns[1]) zu ergänzen.

Eine weitere Ausführung der in den Beilagen enthaltenen mathematischen Ableitungen findet sich in den „Vorlesungen über die mathematischen Prinzipien der Akustik" von H. v. Helmholtz, herausgegeben von Arthur König und Carl Runge, Leipzig 1898 (Bd. III der Vorlesungen über theoretische Physik).

Zum Schluß noch einige Worte über das Äußere der neuen Auflage. Dank dem liebenswürdigen Entgegenkommen der Verlagsbuchhandlung war es möglich, den Druck (in Anlehnung an die Typengröße der ersten Auflage) wesentlich zu verbessern. Dabei ist sorgfältig darauf Rücksicht genommen, daß die Seitenzahlen des Textes mit denen der vierten und fünften Auflage annähernd übereinstimmen; für die Beilagen ließ sich dieses aber nicht durchführen. Für die Korrekturen des Textes, in welchen sich bereits in früheren Auflagen eine Reihe von Druckfehlern eingeschlichen hatte, wurde meist bis auf die erste Auflage bzw. auf das Manuskript zurückgegangen, auch des öfteren die englische Übersetzung zu Rat gezogen. — Die Verlagsbuchhandlung beabsichtigte eine Neuzeichnung der Figuren. Es schien jedoch ratsam, von einer solchen abzusehen, einmal bei der Abbildung der von Helmholtz konstruierten Apparate und sodann auch bei sämtlichen anatomischen und physiologischen Darstellungen.

[1]) Riemann, Geschichte der Musiktheorie. Leipzig 1898. Vgl. insb. S. 496 ff.

Frankfurt a. M., im Oktober 1912.

R. Wachsmuth.

INHALTSVERZEICHNIS.

Seite

Einleitung . . . . . 1 bis 9

Beziehung der Musikwissenschaft zur Akustik. Trennung der physikalischen und physiologischen Akustik. Plan der Untersuchung.

Erste Abteilung.

Die Zusammensetzung der Schwingungen.

Obertöne und Klangfarben.

Erster Abschnitt: **Von der Schallempfindung im allgemeinen** . . . . . 13 bis 39

Unterschied zwischen Geräusch und Klang. Letzterer entspricht regelmäßig periodischen Bewegungen der Luftmasse. Allgemeine Eigentümlichkeiten der Wellenbewegungen. Während die Wellen kontinuierlich fortschreiten, führen die Teilchen des Mediums, durch welches sie fortschreiten, periodische Bewegungen aus. Die Stärke der Klänge hängt von der Amplitude der Schwingungen, die Tonhöhe von der Dauer ihrer Periode ab. Einfache Verhältnisse der Schwingungszahlen für konsonante Intervalle. Berechnung derselben für die ganze Skala. Die Klangfarbe muß von der Schwingungsform abhängen. Begriff der Schwingungsform. Graphische Darstellung derselben. Harmonische Obertöne.

Zweiter Abschnitt: **Die Zusammensetzung der Schwingungen** . . . . . 40 bis 59

Zusammensetzung der Wellen zuerst erläutert an Wasserwellen. Die Höhen verschiedener Wellenzüge addieren sich zueinander algebraisch. Entsprechende Superposition der Schallwellen in der Luft. Zusammengesetzte Schwingungen können regelmäßig periodisch sein, wenn ihre Schwingungszahlen ganze Vielfache derselben Zahl sind. Alle periodischen Luftbewegungen können aus einfachen pendelartigen Schwingungen zusammengesetzt gedacht werden. Dieser Zusammensetzung entspricht nach Ohm die Zusammensetzung des Klanges aus Obertönen.

Dritter Abschnitt: **Analyse der Klänge durch Mittönen** . . . . . 60 bis 83

Erklärung des mechanischen Vorganges beim Mittönen. Es tritt ein, wenn die erregende Klangmasse einen einfachen Ton enthält, der einem der Eigentöne des mittönenden Körpers entspricht. Verschiedenheiten der Erscheinung an Stimmgabeln und Membranen. Beschreibung der Resonatoren zur genaueren Analyse der Klänge. Mittönen der Saiten.

Seite

Vierter Abschnitt: **Von der Zerlegung der Klänge durch das Ohr** . . 84 bis 112

Methoden, die Obertöne zu beobachten. Beweis für das Ohmsche Gesetz, geführt mittels der Klänge gezupfter Saiten, mittels einfacher Töne von Stimmgabeln und mittels der Resonatoren. Unterschied von Klang und Ton. Streit zwischen Ohm und Seebeck. Die Schwierigkeiten in der Wahrnehmung der Obertöne beruhen auf einer gemeinsamen Eigentümlichkeit aller menschlichen Sinneswahrnehmungen. Wir sind in der Beobachtung unserer Sinnesempfindungen nur so weit geübt, als sie uns zur Erkenntnis der Außenwelt dienen.

Fünfter Abschnitt: **Von den Unterschieden der musikalischen Klangfarben** 113 bis 193

Begrenzung des Begriffs der musikalischen Klangfarbe. Untersuchung verschiedener Klänge auf ihren Gehalt an Obertönen.

1. Klänge ohne Obertöne 119
2. Klänge mit unharmonischen Nebentönen 120
3. Klänge der Saiten 127
4. Klänge der Streichinstrumente 137
5. Klänge der Flötenpfeifen 149
6. Klänge der Zungenpfeifen 159
7. Klänge der Vokale 168

Ergebnisse für den Charakter der Klänge im allgemeinen.

Sechster Abschnitt: **Über die Wahrnehmung der Klangfarben** . . . . 194 bis 250

Verändert sich der Klang nach dem Phasenunterschied der Obertöne? Versuche darüber mit elektromagnetisch bewegten Stimmgabeln, aus deren Tönen künstlich Vokalklänge zusammengesetzt werden, ergeben die Unabhängigkeit der Klangfarbe von den Phasenunterschieden. Die Hypothese, wonach eine Reihe abgestimmter mitschwingender Teile im Ohr vorhanden sind, erklärt die eigentümlichen Fähigkeiten dieses Organs. Beschreibung der mitschwingenden Teile im Ohr. Grad der Dämpfung dieser Teile. Ansicht über den Nutzen der Schnecke.

Zweite Abteilung.

Die Störungen des Zusammenklanges.

Kombinationstöne
und Schwebungen. Konsonanz und Dissonanz.

Siebenter Abschnitt: **Die Kombinationstöne** . . . . . 253 bis 264

Kombinationstöne entstehen, wo sich Schwingungen zusammensetzen, die nicht unendlich klein sind. Beschreibung ihrer Erscheinung, Gesetz für die Zahl ihrer Schwingungen. Kombinationstöne verschiedener Ordnung. Unterschied ihrer Stärke bei verschiedenen Instrumenten.

Achter Abschnitt: **Von den Schwebungen einfacher Töne** . . . . . 265 bis 289

Erscheinung der Interferenz des Schalles, wenn zwei gleich hohe Töne zusammenkommen. Je nach dem Phasenunterschied erhält

Seite

man Verstärkung oder Schwächung. Beschreibung einer Sirene für Interferenzversuche. Die Interferenz geht über in Schwebungen, wenn die Höhe beider Töne etwas verschieden ist. Gesetz für die Zahl der Schwebungen. Sichtbare Schwebungen an mittönenden Körpern. Grenze für ihre Schnelligkeit.

Neunter Abschnitt: **Tiefe und tiefste Töne** . . . . . 290 bis 298

Die bisherigen Versuche darüber sind ungenügend, weil Täuschung durch Obertöne möglich war, wie sich an der Sirene mittels der Zahl der Schwebungen nachweisen läßt. Die Töne unter 40 Schwebungen gehen in ein Dröhnen über, dessen Tonhöhe unvollkommen oder gar nicht zu bestimmen ist. Die einzelnen Luftstöße können auch bei viel höheren Klängen noch mittels der Schwebungen der hohen Obertöne erkannt werden.

Zehnter Abschnitt: **Schwebungen der Obertöne** . . . . . 299 bis 324

Je zwei Obertöne zweier Klänge, wenn sie nahehin gleiche Tonhöhe haben, können Schwebungen geben; wenn die beiden Obertöne dagegen ganz zusammenfallen, tritt Konsonanz ein. Reihenfolge der verschiedenen Konsonanzen nach der Deutlichkeit ihrer Abgrenzung von den benachbarten Dissonanzen. Anzahl der Schwebungen bei verstimmten Konsonanzen und ihr Einfluß auf die Rauhigkeit. Störung jeder Konsonanz durch die benachbarten Konsonanzen. Reihenfolge ihres Wohlklanges.

Elfter Abschnitt: **Die Schwebungen der Kombinationstöne** . . . . . 325 bis 347

Die Differenztöne erster Ordnung verschiedener Paare von Partialtönen zweier Klänge können Schwebungen von großer Deutlichkeit geben; schwächere die Kombinationstöne höherer Ordnung auch für einfache primäre Töne. Einfluß der Klangfarben auf die Schärfe der Dissonanzen und den Wohlklang der Konsonanzen.

Zwölfter Abschnitt: **Von den Akkorden** . . . . . 348 bis 382

Die konsonanten dreistimmigen Akkorde. Unterschied der Dur- und Mollakkorde durch ihre Kombinationstöne. Unterschied des Wohlklanges bei den verschiedenen Umlagerungen der drei- und vierstimmigen Dur- und Mollakkorde. Rückblicke auf den bisherigen Gang der Untersuchung.

Dritte Abteilung.

Die Verwandtschaft der Klänge.

Tonleitern und Tonalität.

Dreizehnter Abschnitt: **Übersicht der verschiedenen Prinzipien des musikalischen Stils in der Entwickelung der Musik** . . . . . 385 bis 411

Unterschied der naturwissenschaftlichen und ästhetischen Methode. Das System der Tonleitern, Tonarten und der Harmoniebildung hängt nicht bloß von natürlichen Ursachen, sondern auch von ästhetischen Stilprinzipien ab. Drei Hauptperioden sind zu unterscheiden:

Seite

1. Die homophone Musik 390
2. Die polyphone Musik 400
3. Die harmonische Musik 405

Vierzehnter Abschnitt: **Die Tonalität der homophonen Musik** . . . . 412 bis 469

Ästhetischer Grund für das Gesetz des stufenweisen Fortschritts in der Skala. Verwandtschaft der Klänge beim melodischen Fortschritt beruht auf der Gleichheit zweier Partialtöne. So ist zuerst gefunden worden die Oktave, Quinte und Quarte. Schwankungen in den Terzen und Sexten. Die fünfstufigen Leitern der Chinesen und Gälen; die chromatischen und enharmonischen Leitern der Griechen; die siebenstufige diatonische Leiter des Pythagoras; die Tongeschlechter der Griechen und der altchristlichen Kirche. Rationelle Konstruktion der diatonischen Leiter nach dem Prinzip der Tonverwandtschaft ersten und zweiten Grades ergibt die fünf melodischen Tonleitern des Altertums. Genauere Bezeichnung der Tonhöhe eingeführt. Eigentümliche Auffindung der natürlichen Terzen im arabisch-persischen Musiksystem. Bedeutung des Leittones und dadurch bedingte Änderung der modernen Skalen.

Fünfzehnter Abschnitt: **Die konsonanten Akkorde der Tonart** . . . . 470 bis 500

Akkorde als Vertreter von Klängen. Zurückführung aller Töne auf die engsten Verwandtschaften in der populären Harmoniefolge der Durtonart. Zweideutige Klangbedeutung der Mollakkorde. Der tonische Akkord als Zentrum der Akkordfolge. Verwandtschaft der Akkorde. Unter den alten Tongeschlechtern sind Dur und Moll zur Harmoniebildung am geschicktesten. Moderne Reste der alten Tongeschlechter.

Sechzehnter Abschnitt: **Das System der Tonarten** . . . . . 501 bis 533

Relativer und absoluter Charakter verschiedener Tonarten. Die Modulation führt zur temperierten Stimmung der Intervalle. Hauptmanns System läßt noch eine Vereinfachung zu, die es praktisch ausführbar macht. Beschreibung eines Harmoniums mit natürlicher Stimmung. Nachteile der temperierten Stimmung. Regeln der Modulation bei reiner Stimmung.

Siebzehnter Abschnitt: **Von den dissonanten Akkorden** . . . . . 534 bis 559

Aufzählung der dissonanten Intervalle der Skala. Die dissonanten Dreiklänge, die Septimenakkorde. Begriff der dissonanten Note. Dissonante Akkorde als Vertreter von Klängen.

Achtzehnter Abschnitt. **Gesetze der Stimmführung** . . . . . 560 bis 580

Kettenweise Verbindung der Klänge einer Melodie. Daraus folgen Regeln für die Bewegung der dissonanten Note. Auflösung der Dissonanzen. Kettenweise Verbindung der Akkorde, Auflösung der Septimenakkorde. Oktaven- und Quintenparallelen. Unharmonischer Querstand.

Seite

Neunzehnter Abschnitt. **Beziehungen zur Ästhetik** . . . . . 581 bis 599

Das Gesetz von der unbewußten Gesetzmäßigkeit der Kunstwerke. Das Gesetz der melodischen Folge der Töne beruht auf einem Akt der Empfindung, nicht des Bewußtseins Ebenso der Unterschied der Konsonanz und Dissonanz. Schluß

Beilagen.

1. Elektromagnetische Treibmaschine für die Sirene . . . 600
2. Maße und Verfertigung von Resonatoren 600
3. Die Bewegung gezupfter Saiten 603
4. Herstellung einfacher Töne durch Resonanz 606
5. Schwingungsform der Klaviersaiten 609
6. Analyse der Bewegung von Violinsaiten 615
7. Zur Theorie der Pfeifen 619
A. Einfluß der Resonanz in den Zungenpfeifen 619
B. Theorie des Anblasens der Pfeifen 621
I. Das Anblasen der Zungenpfeifen 622
II. Das Anblasen der Flötenpfeifen 626
8. Praktische Anweisungen für die Versuche über Zusammensetzung der Vokale 629
9. Phasen der durch Resonanz entstandenen Wellen . . 632
10. Beziehung zwischen der Stärke des Mitschwingens und der Dauer des Ausschwingens 638
11. Schwingungen der Membrana basilaris der Schnecke . 639
12. Theorie der Kombinationstöne 646
13. Beschreibung des Mechanismus für die Öffnung einzelner Löcherreihen in der mehrstimmigen Sirene . . 648
14. Schwankung der Tonhöhe bei den Schwebungen einfacher Töne 649
15. Berechnung der Intensität der Schwebungen verschiedener Intervalle 650
16. Schwebungen der Kombinationstöne 653
17. Plan für rein gestimmte Instrumente mit einem Manual 656
18. Anwendung der reinen Intervalle beim Gesang . . . 658
19. Plan von Herrn Bosanquets Manual 662

Register 665

Druckfehlerberichtigung 668

Einleitung.

Das vorliegende Buch sucht die Grenzgebiete von Wissenschaften zu vereinigen, welche, obgleich durch viele natürliche Beziehungen aufeinander hingewiesen, bisher doch ziemlich getrennt nebeneinander gestanden haben, die Grenzgebiete nämlich einerseits der physikalischen und physiologischen Akustik, andererseits der Musikwissenschaft und Ästhetik. Dasselbe wendet sich also an einen Kreis von Lesern, welche einen sehr verschiedenartigen Bildungsgang durchgemacht haben und sehr abweichende Interessen verfolgen; es wird deshalb nicht unnötig sein, wenn der Verfasser gleich von vornherein sich darüber ausspricht, in welchem Sinne er diese Arbeit unternommen und welches Ziel er dadurch zu erreichen gesucht hat. Der naturwissenschaftliche, der philosophische, der künstlerische Gesichtskreis sind in neuerer Zeit, mehr als billig ist, auseinander gerückt worden, und es besteht deshalb in jedem dieser Kreise für die Sprache, die Methoden und die Zwecke des anderen eine gewisse Schwierigkeit des Verständnisses, welche auch bei der hier zu verfolgenden Aufgabe hauptsächlich verhindert haben mag, daß sie nicht schon längst eingehender bearbeitet und ihrer Lösung entgegengeführt worden ist.

Zwar bedient sich die Akustik überall der aus der Harmonielehre entnommenen Begriffe und Namen, sie spricht von der Tonleiter, den Intervallen, Konsonanzen usw.; zwar beginnen die Lehrbücher über Generalbaß gewöhnlich mit einem physikalischen Kapitel, welches von den Schwingungszahlen der Töne redet und die Verhältnisse derselben für die verschiedenen Intervalle festsetzt, aber bisher ist diese Verbindung der Akustik mit der Musikwissenschaft eine reine äußerliche geblieben, eigentlich mehr ein Zeichen, daß man das Bedürfnis einer Verbindung der genannten Wissenschaften fühlte und anerkannte, als daß man eine solche tatsächlich herzustellen gewußt hätte. Denn die physikalischen Kenntnisse konnten zwar für den Erbauer musikalischer Instrumente von Nutzen sein, für die weitere Entwickelung

und Begründung der Harmonielehre dagegen ist bisher die physikalische Einleitung noch ganz unfruchtbar geblieben. Und doch sind die wesentlichsten Tatsachen dieses Gebietes, um deren Erklärung und Ausbeutung es sich zunächst handelte, seit uralter Zeit bekannt. Schon Pythagoras wußte, daß, wenn Saiten von gleicher Beschaffenheit, gleicher Spannung, aber ungleicher Länge die vollkommenen Konsonanzen der Oktave, Quinte oder Quarte geben sollen, ihre Längen im Verhältnis von 1 zu 2, von 2 zu 3 oder 3 zu 4 stehen müssen, und wenn er, wie zu vermuten ist, seine Kenntnisse zum Teil von den ägyptischen Priestern erhalten hat, so läßt sich gar nicht absehen, bis in wie unvordenkliche Zeiten die Kenntnis dieses Gesetzes zurückreicht. Die neuere Physik hat das Gesetz des Pythagoras erweitert, indem sie von den Saitenlängen zu den Schwingungszahlen überging, wodurch es auf Töne aller musikalischen Instrumente anwendbar wurde; man hat ferner für die weniger vollkommenen Konsonanzen der Terzen die Zahlenverhältnisse 4 zu 5 und 5 zu 6 den obengenannten hinzugefügt, aber es ist mir nicht bekannt, daß wirklich ein Fortschritt gemacht wäre in der Beantwortung der Frage: was haben die musikalischen Konsonanzen mit den Verhältnissen der ersten sechs ganzen Zahlen zu tun? Sowohl Musiker, wie Philosophen und Physiker haben sich meist bei der Antwort beruhigt, daß die menschliche Seele auf irgend eine uns unbekannte Art die Zahlenverhältnisse der Tonschwingungen ermitteln könne und daß sie ein besonderes Vergnügen daran habe, einfache und leicht überschauliche Verhältnisse vor sich zu haben.

Inzwischen hat die Ästhetik der Musik in denjenigen Fragen, deren Entscheidung mehr auf psychologischen als auf sinnlichen Momenten beruht, unverkennbare Fortschritte gemacht, namentlich dadurch, daß man den Begriff der Bewegung bei der Untersuchung der musikalischen Kunstwerke betont hat. E. Hanslick hat in seinem Buche „Über das Musikalisch Schöne“ mit schlagender Kritik den falschen Standpunkt überschwänglicher Sentimentalität, von dem aus man über Musik zu theoretisieren liebte, angegriffen und zurückgewiesen auf die einfachen Elemente der melodischen Bewegung. In breiterer Ausführung finden wir die ästhetischen Beziehungen für die Architektonik musikalischer Kompositionen und die charakteristischen Unterschiede der einzelnen Kompositionsformen auseinander

gesetzt in Vischers Ästhetik. Wie in der unorganischen Welt durch die Art der Bewegung die Art der sie treibenden Kräfte offenbart wird, und sogar in letzter Instanz die elementaren Kräfte der Natur durch nichts anderes erkannt und gemessen werden können, als durch die unter ihrer Einwirkung zustande kommenden Bewegungen, so ist es auch mit den Bewegungen, sei es des Körpers, sei es der Stimme, welche unter dem Einfluß menschlicher Gemütsstimmungen vor sich gehen. Welche Eigentümlichkeiten der Tonbewegung daher den Charakter des Zierlichen, Tändelnden oder des Schwerfälligen, Angestrengten, des Matten oder des Kräftigen, des Ruhigen oder Aufgeregten usw. geben, hängt offenbar hauptsächlich von psychologischen Motiven ab. Ebenso die Beantwortung derjenigen Fragen, welche das Gleichgewicht der einzelnen Teile einer Komposition, ihre Entwickelung auseinander, ihre Verbindung zu einem klar überschaulichen Ganzen betreffen, die sich den ähnlichen Fragen in der Theorie der Baukunst ganz eng anschließen. Aber alle diese Untersuchungen, wenn sie auch mancherlei Früchte zutage fördern, müssen lückenhaft und unsicher bleiben, solange ihnen ihr eigentlicher Anfang und ihre Grundlage fehlt, nämlich die wissenschaftliche Begründung der elementaren Regeln für die Konstruktion der Tonleiter, der Akkorde, der Tonarten, überhaupt alles dessen, was in dem sogenannten Generalbaß zusammengestellt zu werden pflegt. In diesem elementaren Gebiete haben wir es nicht allein mit freien künstlerischen Erfindungen, sondern auch mit der unmittelbaren Naturgewalt der sinnlichen Empfindung zu tun. Die Musik steht in einem viel näheren Verhältnis zu den reinen Sinnesempfindungen, als sämtliche übrigen Künste, welche es vielmehr mit den Sinneswahrnehmungen, d. h. mit den Vorstellungen von äußeren Objekten zu tun haben, die wir erst mittels psychischer Prozesse aus den Sinnesempfindungen gewinnen. Die Dichtkunst geht am entschiedensten allein darauf aus, Vorstellungen anzuregen, indem sie sich an Phantasie und Gedächtnis wendet; und nur mit untergeordneten Hilfsmitteln mehr musikalischer Art, z. B. dem Rhythmus, der Tonmalerei, wendet sie sich zuweilen an die unmittelbare sinnliche Empfindung des Ohres. Ihre Wirkungen beruhen deshalb fast ausschließlich auf psychischen Tätigkeiten. Die bildenden Künste benutzen zwar die sinnlichen Empfindungen des Auges, aber doch

in nicht viel anderer Absicht, als die Dichtkunst sich an das Ohr wendet. Hauptsächlich wollen sie in uns nur die Vorstellung eines äußeren Objektes von bestimmter Form und Farbe hervorbringen. Wir sollen uns wesentlich nur für den dargestellten Gegenstand interessieren und an seiner Schönheit uns erfreuen, nicht an den Mitteln der Darstellung. Wenigstens ist die Freude des Kunstkenners an dem Virtuosentum der Technik einer Statue oder eines Gemäldes nicht wesentlicher Bestandteil des Kunstgenusses.

Nur in der Malerei findet sich die Farbe als ein Element, welches unmittelbar von der sinnlichen Empfindung aufgenommen wird, ohne daß sich Akte des Verständnisses einzuschieben brauchen. In der Musik dagegen sind es wirklich geradezu die Tonempfindungen, welche das Material der Kunst bilden; wir bilden aus diesen Empfindungen, wenigstens so weit sie in der Musik zur Geltung kommen, nicht die Vorstellungen äußerlicher Gegenstände und Vorgänge. Oder wenn uns auch bei den Tönen eines Konzerts einfällt, daß dieser von einer Violine, jener von einer Klarinette gebildet sei, so beruht doch das künstlerische Wohlgefallen nicht auf der Vorstellung der Violine und Klarinette, sondern nur auf der Empfindung ihrer Töne, während umgekehrt das künstlerische Wohlgefallen an einer Marmorstatue nicht auf der Empfindung des weißen Lichtes beruht, welches sie in das Auge sendet, sondern auf der Vorstellung des schön geformten menschlichen Körpers, den sie darstellt. In diesem Sinne ist es klar, daß die Musik eine unmittelbarere Verbindung mit der sinnlichen Empfindung hat, als irgend eine der anderen Künste; und daraus folgt denn, daß die Lehre von den Gehörempfindungen berufen sein wird, in der musikalischen Ästhetik eine viel wesentlichere Rolle zu spielen, als etwa die Lehre von der Beleuchtung oder der Perspektive in der Malerei. Diese letzteren sind allerdings dem Künstler nützlich, um eine möglichst vollendete Naturwahrheit zu erreichen, haben aber mit der künstlerischen Wirkung des Werkes nichts zu tun. In der Musik dagegen wird gar keine Naturwahrheit erstrebt, die Töne und Tonempfindungen sind ganz allein ihrer selbst wegen da und wirken ganz unabhängig von ihrer Beziehung zu irgend einem äußeren Gegenstande.

Diese Lehre von den Gehörempfindungen fällt nun in das Gebiet der Naturwissenschaft, und zwar zunächst der physiologischen

Akustik. Bisher ist von der Lehre vom Schall fast nur der physikalische Teil ausführlich behandelt worden, d. h. man hat die Bewegungen untersucht, welche tönende feste, flüssige oder luftförmige Körper ausführten, wenn sie einen dem Ohr vernehmbaren Schall hervorbrachten. Diese physikalische Akustik ist ihrem Wesen nach nichts als ein Teil der Lehre von den Bewegungen der elastischen Körper. Ob man die Schwingungen, welche gespannte Saiten ausführen, an einer Spirale aus Messingdraht beobachtet, deren Bewegungen so langsam geschehen, daß man ihnen mit dem Auge bequem folgen kann, die aber eben deshalb keine Schallempfindung erregen, oder ob man eine Violinsaite schwingen läßt, deren Schwingungen das Auge kaum wahrnimmt, während das Ohr sie hört, ist in physikalischer Beziehung ganz gleichgültig. Die Gesetze der schwingenden Bewegungen sind in beiden Fällen ganz die nämlichen, und ob sie schnell oder langsam geschehen, ist ein Umstand, der in diesen Gesetzen nichts ändert, wohl aber den beobachtenden Physiker zwingt, verschiedene Methoden der Beobachtung anzuwenden, bald das Auge, bald das Ohr zu benutzen. In der physikalischen Akustik wird also auf die Erscheinungen des Gehörs nur deshalb Rücksicht genommen, weil das Ohr das bequemste und nächstliegende Hilfsmittel zur Beobachtung der schnelleren elastischen Schwingungen ist, und der Physiker die Eigentümlichkeiten dieses zur Beobachtung verwendeten natürlichen Instrumentes kennen muß, um richtige Schlüsse aus seinen Aussagen ziehen zu können. Daher hat die bisherige physikalische Akustik wohl mancherlei Kenntnisse und Beobachtungen gesammelt, welche der Lehre von den Tätigkeiten des Ohres, also der physiologischen Akustik, angehören, aber sie sind nicht als Hauptzweck ihrer Untersuchungen ausgemittelt worden, sondern nur nebenbei und stückweise. Daß überhaupt in der Physik ein besonderes Kapitel über Akustik von der Lehre über die Bewegungen der elastischen Körper abgetrennt zu werden pflegt, zu welcher es dem Wesen der Sache nach gehören sollte, ist eben nur dadurch gerechtfertigt, daß durch die Anwendung des Ohres eigentümliche Arten von Versuchen und Beobachtungsmethoden herbeigeführt wurden.

Neben der physikalischen besteht eine physiologische Akustik, welche die Vorgänge im Ohr selbst zu untersuchen hat. Von dieser Wissenschaft hat derjenige Teil, welcher die Leitung der Schall-

bewegung vom Eingang des Ohres bis zu den Nervenausbreitungen im Labyrinth des inneren Ohres behandelt, mannigfache Bearbeitung erfahren, in Deutschland namentlich, seit Johannes Müller den Anfang darin gemacht hatte. Freilich müssen wir zugleich sagen, daß noch nicht viel sichergestellte Ergebnisse hierin gewonnen sind. Mit diesen Bestrebungen war aber erst ein Teil der Aufgabe angegriffen, ein anderer Teil ganz liegen geblieben. Die Untersuchung der Vorgänge in jedem unserer Sinnesorgane hat im allgemeinen drei verschiedene Teile. Zunächst ist zu untersuchen, wie das Agens, welches die Empfindung erregt, also im Auge das Licht, im Ohr der Schall, bis zu den empfindenden Nerven hingeleitet wird. Wir können diesen ersten Teil den physikalischen Teil der entsprechenden physiologischen Untersuchung nennen. Zweitens sind die verschiedenen Erregungen der Nerven selbst zu untersuchen, welche verschiedenen Empfindungen entsprechen, und endlich die Gesetze, nach welchen aus solchen Empfindungen Vorstellungen bestimmter äußerer Objekte, d. h. Wahrnehmungen, zustande kommen. Das gibt also noch zweitens einen vorzugsweise physiologischen Teil der Untersuchung, der die Empfindungen, und drittens einen psychologischen, der die Wahrnehmungen behandelt. Während nun für die Lehre vom Gehör der physikalische Teil schon vielfältig in Angriff genommen worden ist, haben wir bisher aus dem physiologischen und psychologischen Teile nur unvollständige und zufällige Einzelheiten in der Wissenschaft aufzuweisen, und gerade der vorzugsweise physiologische Teil, die Lehre von den Gehörempfindungen, ist es, dessen Resultate die Theorie der Musik von der Naturwissenschaft entnehmen muß.

In dem vorliegenden Buche habe ich mich nun bemüht, zunächst das Material für die Lehre von den Gehörempfindungen zusammenzubringen, soweit es bisher fertig vorlag oder von mir durch eigene Untersuchungen ergänzt werden konnte. Natürlich muß ein solcher erster Versuch ziemlich lückenhaft bleiben und sich auf die Grundzüge und die interessantesten Teile des betreffenden Gebietes beschränken. In diesem Sinne bitte ich die hier vorliegenden Studien aufzunehmen. Wenn auch in den zusammengestellten Sätzen nur weniges vorkommt von vollkommen neuen Entdeckungen, vielmehr das, was von neuen Tatsachen und Betrachtungen etwa darin enthalten ist, sich meist unmittelbar daraus ergab, daß ich die schon

bekannten Theorien und Versuchsmethoden vollständiger in ihre Konsequenzen verfolgte und auszubeuten suchte, als dies bisher geschehen war, so gewinnen doch, wie ich meine, die Tatsachen vielfältig eine neue Wichtigkeit und eine neue Beleuchtung, wenn man sie aus einem anderen Standpunkte und in einem anderen Zusammenhange als bisher betrachtet.

Die erste Abteilung der nachfolgenden Untersuchung ist wesentlich physikalischen und physiologischen Inhalts; es wird darin das Phänomen der harmonischen Obertöne untersucht; es wird die Natur dieses Phänomens festgestellt, seine Beziehung zu den Unterschieden der Klangfarbe nachgewiesen, und es werden eine Reihe von Klangfarben in Beziehung auf ihre Obertöne analysiert, wobei sich denn zeigt, daß die Obertöne nicht etwa, wie man bisher wohl meist glaubte, eine vereinzelt vorkommende Erscheinung von geringer Intensität seien, daß sie vielmehr mit sehr wenigen Ausnahmen den Klängen fast aller Toninstrumente zukommen, und gerade in den zu musikalischen Zwecken brauchbarsten Klangfarben eine erhebliche Stärke erreichen. Die Frage, wie die Wahrnehmung der Obertöne durch das Ohr zustande kommen könne, führt dann zu einer Hypothese über die Erregungsweise des Hörnerven, welche geeignet ist, sämtliche in das vorliegende Gebiet gehörige Tatsachen und Gesetze auf eine verhältnismäßig einfache mechanische Vorstellung zurückzuführen.

Die zweite Abteilung behandelt die Störungen des gleichzeitigen Erklingens zweier Töne, nämlich die Kombinationstöne und die Schwebungen. Die physiologisch-physikalische Untersuchung ergibt, daß zwei Töne nur dann im Ohr gleichzeitig empfunden werden können, ohne sich gegenseitig in ihrem Abfluß zu stören, wenn sie in ganz bestimmten Intervallverhältnissen zueinander stehen, den bekannten Intervallen der musikalischen Konsonanzen. So werden wir hier unmittelbar in das musikalische Gebiet hinübergeführt, und es wird der physiologische Grund für das rätselhafte von Pythagoras verkündete Gesetz der Zahlenverhältnisse aufgedeckt. Die Größe der konsonanten Intervalle ist unabhängig von der Klangfarbe, aber der Grad des Wohlklanges der Konsonanzen, die Schärfe ihres Unterschiedes von den Dissonanzen ergibt sich als abhängig von der Klangfarbe. Die Folgerungen der physiologischen Theorie stimmen in diesem Gebiete mit den Regeln der musikalischen Akkordlehre

durchaus zusammen; sie gehen selbst noch mehr in das Spezielle, als diese es kann, und haben, wie ich glaube, die Autorität der besten Komponisten für sich.

In diesen beiden ersten Abteilungen des Buches kommen ästhetische Rücksichten gar nicht in Betracht, es handelt sich durchaus um Naturphänomene, die mit blinder Notwendigkeit eintreten. Die dritte Abteilung behandelt die Konstruktion der Tonleitern und Tonarten. Hier befinden wir uns auf ästhetischem Gebiete, die Differenzen des nationalen und individuellen Geschmacks beginnen. Die moderne Musik hat hauptsächlich das Prinzip der Tonalität streng und konsequent entwickelt, wonach alle Töne eines Tonstückes durch ihre Verwandtschaft mit einem Hauptton, der Tonika, zusammengeschlossen werden. Sobald wir dieses Prinzip als gegeben annehmen, leitet sich aus den Resultaten der vorausgegangenen Untersuchungen die Konstruktion unserer modernen Tonleitern und Tonarten auf einem alle Willkürlichkeit ausschließenden Wege ab.

Ich habe die physiologische Untersuchung von den musikalischen Folgerungen nicht trennen mögen, denn dem Physiologen muß die Richtigkeit dieser Folgerungen als eine Unterstützung für die Richtigkeit der vorgetragenen physikalischen und physiologischen Ansichten gelten, und dem Leser, welcher im musikalischen Interesse das Buch vornimmt, kann der Sinn und die Tragweite der Folgerungen nicht ganz klar werden, wenn er nicht die naturwissenschaftlichen Grundlagen wenigstens ihrem Sinne nach zu verstehen gesucht hat. Übrigens habe ich, um das Verständnis des Buches auch Lesern zugänglich zu erhalten, denen eine eingehende Kenntnis der Physik und Mathematik fehlt, sowohl die spezielleren Anweisungen für die Ausführung komplizierterer Versuche, als auch alle mathematischen Erörterungen in den Anhang am Schluß des Buches verwiesen. Dieser Anhang ist also besonders für den Physiker bestimmt, und enthält die Beweisstücke für meine Behauptungen. Ich hoffe auf diese Weise den Interessen der verschiedenen Leser gerecht zu werden.

Das rechte Verständnis freilich wird sich nur demjenigen Leser eröffnen können, der sich die Mühe nimmt, durch eigene Beobachtung wenigstens die Fundamentalphänomene, von denen in der folgenden Untersuchung die Rede ist, kennen zu lernen. Glücklicherweise ist es nicht sehr schwer, mit Hilfe der gewöhnlichsten musikalischen

Instrumente Obertöne, Kombinationstöne, Schwebungen usw. kennen zu lernen. Eigene Wahrnehmung ist mehr wert als die genaueste Beschreibung, besonders wo es sich, wie hier, um eine Analyse von Sinnesempfindungen handelt, die sich schlecht genug jemandem beschreiben lassen, der sie nicht selbst erlebt hat.

Ich hoffe, bei diesem meinem etwas ungewöhnlichen Versuche, von seiten der Naturwissenschaft in die Theorie der Künste einzugreifen, gebührend auseinander gehalten zu haben, was der Physiologie und was der Ästhetik angehört, doch kann ich mir kaum verhehlen, daß meine Erörterungen, obgleich sie sich nur auf das niederste Gebiet der musikalischen Grammatik beziehen, solchen Kunsttheoretikern vielleicht als zu mechanisch und der Würde der Kunst widersprechend erscheinen werden, welche gewohnt sind, die enthusiastischen Seelenzustände, wie sie durch die höchsten Leistungen der Kunst hervorgerufen werden, auch zur wissenschaftlichen Untersuchung ihrer Grundlagen mitzubringen. Diesen gegenüber will ich nur noch bemerken, daß es sich bei der nachfolgenden Untersuchung wesentlich nur um die Analyse tatsächlich bestehender sinnlicher Empfindungen handelt, daß die physikalischen Beobachtungsmethoden, welche herbeigezogen werden, fast nur dazu dienen sollen, das Geschäft dieser Analyse zu erleichtern, zu sichern, und ihre Vollständigkeit zu kontrollieren, und daß diese Analyse der Sinnesempfindungen genügen würde, die Endergebnisse für die musikalische Theorie zu liefern, selbst ohne Bezug auf die physiologische Hypothese über den Mechanismus des Hörens, die ich schon erwähnt habe, welche ich jedoch nicht weglassen wollte, weil sie einen außerordentlich einfachen Zusammenhang in die sehr mannigfachen und sehr verwickelten Phänomene dieses Gebietes zu bringen geeignet ist[1]).

[1]) Für Leser, die in mathematischen und physikalischen Betrachtungen wenig geübt sind, ist eine abgekürztere Darstellung des wesentlichen Inhalts dieses Buches gegeben in Sedley Taylor, Sound and Music. London, Macmillan and Co., 1883. Für eben solche Leser ist eine anschauliche Auseinandersetzung der physikalischen Beziehungen des Schalles gegeben in J. Tyndall, On Sound, a course of eight lectures. London, Longmans, Green and Co., 1893. Dasselbe in deutscher Übersetzung unter dem Titel: Der Schall, herausgegeben von H. v. Helmholtz und G. Wiedemann. Zweite Auflage. Braunschweig 1895. (Weitere Literaturangaben finden sich in dem Vorwort zur vorliegenden Auflage. Der Her.)

ERSTE ABTEILUNG

DIE

ZUSAMMENSETZUNG DER SCHWINGUNGEN

OBERTÖNE UND KLANGFARBEN

Erster Abschnitt.

Von der Schallempfindung im allgemeinen.

Sinnliche Empfindungen kommen zustande, indem äußere Reizmittel auf die empfindlichen Nervenapparate unseres Körpers einwirken und diese in Erregungszustand versetzen. Die Art der Empfindung ist verschieden, teils nach dem Sinnesorgane, welches in Anspruch genommen worden ist, teils nach der Art des einwirkenden Reizes. Jedes Sinnesorgan vermittelt eigentümliche Empfindungen, welche durch kein anderes erregt werden können, das Auge Lichtempfindungen, das Ohr Schallempfindungen, die Haut Tastempfindungen. Selbst wenn dieselben Sonnenstrahlen, welche dem Auge die Empfindung des Lichtes erregen, die Haut treffen und deren Nerven erregen, so werden sie hier doch nur als Wärme, nicht als Licht empfunden, und ebenso können die Erschütterungen elastischer Körper, welche das Ohr hört, auch von der Haut empfunden werden, aber nicht als Schall, sondern als Schwirren. Schallempfindung ist also die dem Ohr eigentümliche Reaktionsweise gegen äußere Reizmittel, sie kann in keinem anderen Organe des Körpers hervorgebracht werden, und unterscheidet sich durchaus von allen Empfindungen aller übrigen Sinne.

Da wir uns hier die Aufgabe gestellt haben, die Gesetze der Gehörempfindungen zu studieren, so wird es unsere erste Aufgabe sein, zu untersuchen, wieviel verschiedene Arten von Empfindungen unser Ohr erzeugen kann, und welche Unterschiede des äußeren Erregungsmittels, nämlich des Schalles, diesen Unterschieden der Empfindung entsprechen.

Der erste und Hauptunterschied verschiedenen Schalles, den unser Ohr auffindet, ist der Unterschied zwischen Geräuschen und musikalischen Klängen. Das Sausen, Heulen und Zischen des Windes, das Plätschern des Wassers, das Rollen und Rasseln eines Wagens

sind Beispiele der ersten Art, die Klänge sämtlicher musikalischen Instrumente Beispiele der zweiten Art des Schalles. Zwar können Geräusche und Klänge in mannigfach wechselnden Verhältnissen sich vermischen und durch Zwischenstufen ineinander übergehen, ihre Extreme sind aber weit voneinander getrennt.

Um das Wesen des Unterschiedes zwischen Klängen und Geräuschen zu ermitteln, genügt in den meisten Fällen schon eine aufmerksame Beobachtung des Ohres allein, ohne daß es durch künstliche Hilfsmittel unterstützt zu werden braucht. Es zeigt sich nämlich im allgemeinen, daß im Verlauf eines Geräusches ein schneller Wechsel verschiedenartiger Schallempfindungen eintritt. Man denke an das Rasseln eines Wagens auf Steinpflaster, das Plätschern und Brausen eines Wasserfalles oder der Meereswogen, das Rauschen der Blätter im Walde. Hier haben wir überall einen raschen und unregelmäßigen, aber deutlich erkennbaren Wechsel stoßweise aufblitzender verschiedenartiger Laute. Beim Heulen des Windes ist der Wechsel langsam, der Schall zieht sich langsam und allmählich in die Höhe und sinkt dann wieder. Mehr oder weniger gut gelingt die Trennung verschiedenartiger unruhig wechselnder Laute auch bei den meisten anderen Geräuschen; wir werden später ein Hilfsmittel kennen lernen, die Resonatoren, mittels dessen diese Unterscheidung dem Ohr beträchtlich erleichtert wird. Ein musikalischer Klang dagegen erscheint dem Ohr als ein Schall, der vollkommen ruhig, gleichmäßig und unveränderlich dauert, solange er eben besteht, in ihm ist kein Wechsel verschiedenartiger Bestandteile zu unterscheiden. Ihm entspricht also eine einfache und regelmäßige Art der Empfindung, während in einem Geräusche viele verschiedenartige Klangempfindungen unregelmäßig gemischt und durcheinander geworfen sind. In der Tat kann man Geräusche aus musikalischen Klängen zusammensetzen, wenn man z. B. sämtliche Tasten eines Klaviers innerhalb der Breite von einer oder zwei Oktaven gleichzeitig anschlägt. Hiernach ist es klar, daß die musikalischen Klänge die einfacheren und regelmäßigeren Elemente der Gehörempfindungen sind, und daß wir an ihnen zunächst die Gesetze und Eigentümlichkeiten dieser Empfindungen zu studieren haben.

Wir gelangen jetzt zu der weiteren Frage: Welcher Unterschied in dem äußeren Erregungsmittel der Gehörempfindungen bedingt den

Unterschied von Geräusch und Klang? Das normale und gewöhnliche Erregungsmittel für das menschliche Ohr sind Erschütterungen der umgebenden Luftmasse. Die unregelmäßig wechselnde Empfindung des Ohres bei den Geräuschen läßt uns schließen, daß bei diesen auch die Erschütterung der Luft eine unregelmäßig sich verändernde Art der Bewegung sein müsse, daß den musikalischen Klängen dagegen eine regelmäßige in gleichmäßiger Weise andauernde Bewegung der Luft zugrunde liege, welche wiederum erregt sein muß durch eine ebenso regelmäßige Bewegung des ursprünglich tönenden Körpers, dessen Stöße die Luft dem Ohr zuleitet.

Die Art solcher regelmäßiger Bewegungen, welche einen musikalischen Klang hervorbringen, haben nun die physikalischen Untersuchungen genau kennen gelehrt. Es sind dies Schwingungen, d. h. hin und her gehende Bewegungen der tönenden Körper, und diese Schwingungen müssen regelmäßig periodisch sein. Unter einer periodischen Bewegung verstehen wir eine solche, welche nach genau gleichen Zeitabschnitten immer in genau derselben Weise wiederkehrt. Die Länge der gleichen Zeitabschnitte, welche zwischen einer und der nächsten Wiederholung der gleichen Bewegung verfließen, nennen wir die Schwingungsdauer oder die Periode der Bewegung. Welcher Art die Bewegung des bewegten Körpers während der Dauer einer Periode ist, ist dabei ganz gleichgültig. Um den Begriff der periodischen Bewegung an bekannten Beispielen zu erläutern, führe ich an die Bewegungen des Pendels einer Uhr, die Bewegung eines Steines, der an einem Faden befestigt mit gleichbleibender Geschwindigkeit im Kreise herumgeschwungen wird, die Bewegung eines Hammers, der von dem Räderwerk einer Wassermühle nach regelmäßigen Zwischenzeiten gehoben wird und wieder fällt. Alle diese Bewegungen, so verschieden sie sich übrigens auch gestalten mögen, sind periodisch in dem angeführten Sinne. Die Dauer ihrer Periode, welche in diesen Fällen meist eine oder mehrere Sekunden beträgt, ist aber verhältnismäßig lang, verglichen mit den viel kürzeren Perioden der tönenden Schwingungen, von denen bei den tiefsten Tönen mindestens 30 auf eine Sekunde kommen, und deren Anzahl bis auf viele Tausend in der Sekunde steigen kann.

Unserer Definition der periodischen Bewegung gemäß können wir nun die gestellte Frage so beantworten: Die Empfindung eines

Klanges wird durch schnelle periodische Bewegungen der tönenden Körper hervorgebracht, die eines Geräusches durch nicht periodische Bewegungen.

Die tönenden Schwingungen fester Körper können wir sehr häufig mit dem Auge erkennen. Wenn auch die Schwingungen zu schnell vor sich gehen, als daß wir jeder einzelnen mit dem Auge folgen könnten, so erkennen wir doch leicht an einer tönenden Saite, oder Stimmgabel, oder an der Zunge einer Zungenpfeife, daß dieselben in lebhafter hin und her gehender Bewegung zwischen zwei festen Grenzlagen begriffen sind, und das regelmäßige und scheinbar ruhig fortbestehende Bild, welches ein solcher schwingender Körper trotz seiner Bewegung dem Auge darbietet, läßt auf die Regelmäßigkeit seiner Hin- und Hergänge schließen. In anderen Fällen können wir die schwingende Bewegung der tönenden festen Körper fühlen. So fühlt der Blasende die Schwingungen der Zunge am Mundstück der Klarinette, Oboe, des Fagotts, oder die Schwingungen seiner eigenen Lippen im Mundstück der Trompete und Posaune.

Unserem Ohr werden nun die Erschütterungen, welche von den tönenden Körpern ausgehen, in der Regel erst durch Vermittelung der Luft zugetragen. Auch die Luftteilchen müssen periodisch sich wiederholende Schwingungen ausführen, um in unserem Ohr die Empfindung eines musikalischen Klanges hervorzubringen. Dies ist auch in der Tat der Fall, obgleich in der alltäglichen Erfahrung der Schall zunächst als ein Agens erscheint, welches gleichmäßig im Luftraume vorschreitet, indem es sich immer weiter und weiter ausbreitet. Wir müssen aber hier unterscheiden zwischen der Bewegung der einzelnen Luftteilchen selbst — diese ist periodisch hin und her gehend innerhalb enger Grenzen — und der Ausbreitung der Erschütterung des Schalles; diese letztere ist es, welche fortdauernd vorwärts schreitet, indem immer neue und neue Luftteilchen in den Kreis der Erschütterung gezogen werden.

Es ist dies eine Eigentümlichkeit aller sogenannten Wellenbewegungen. Man denke sich in eine eben ruhige Wasserfläche einen Stein geworfen. Um den getroffenen Punkt der Fläche bildet sich sogleich ein kleiner Wellenring, welcher nach allen Richtungen hin gleichmäßig fortschreitend sich zu einem immer größer werdenden Kreise ausdehnt. Diesem Wellenringe entsprechend geht in der Luft

von einem erschütterten Punkte der Schall aus und schreitet nach allen Richtungen fort, soweit die Grenzen der Luftmasse es erlauben. Der Vorgang in der Luft ist im wesentlichen ganz derselbe wie auf der Wasserfläche, der Hauptunterschied ist der, daß der Schall in dem räumlich ausgedehnten Luftmeere nach allen Seiten kugelförmig sich ausbreitend fortschreitet, während die Wellen an der Oberfläche des Wassers nur ringförmig fortschreiten können. Den Bergen der Wasserwellen entsprechen bei den Schallwellen Schichten, in denen die Luft verdichtet ist, den Wellentälern verdünnte Schichten. An der freien Wasseroberfläche kann die Masse nach oben ausweichen, wo sie sich zusammendrängt, und so die Berge bilden. Im Inneren des Luftmeeres muß sie sich verdichten, weil sie nicht ausweichen kann.

Die Wasserwellen also schreiten beständig vorwärts, ohne umzukehren; aber man muß nicht glauben, daß die Wasserteilchen, aus denen die Wellen zusammengesetzt sind, eine ähnliche fortschreitende Bewegung haben, wie die Wellen selbst. Die Bewegungen der Wasserteilchen längs der Oberfläche des Wassers können wir leicht sichtbar machen, indem wir ein Hölzchen auf dem Wasser schwimmen lassen. Ein solches macht die Bewegungen der benachbarten Wasserteilchen vollständig mit. Nun wird ein solches Hölzchen von den Wellenringen nicht mitgenommen, sondern nur auf und ab geschaukelt, und bleibt schließlich an der Stelle ruhen, an der es sich zuerst befand. Wie das Hölzchen, so auch die benachbarten Wasserteilchen. Wenn der Wellenring bei ihnen ankommt, werden sie in Schwankungen versetzt; wenn er vorübergezogen ist, sind sie wieder an ihrer alten Stelle und bleiben nun in Ruhe, während der Wellenring zu immer neuen Stellen der Wasserfläche fortschreitet und diese in Bewegung setzt. Es werden also die Wellen, welche über die Wasseroberfläche hinziehen, fort und fort aus neuen Wasserteilchen aufgebaut, so daß dasjenige, was als Welle fortrückt, nur die Erschütterung, die veränderte Form der Oberfläche ist, während die einzelnen Wasserteilchen in vorübergehenden Schwankungen hin und her gehen, sich aber nie weit von ihrem ersten Platze entfernen.

Noch deutlicher zeigt sich dasselbe Verhältnis bei den Wellen eines Seiles oder einer Kette. Man nehme einen biegsamen Faden von einigen Fuß Länge oder ein dünnes Metallkettchen, halte es an einem Ende und lasse das andere herabhängen, so daß der Faden

nur durch seine Schwere gespannt ist. Nun bewege man die Hand, die es hält, schnell ein wenig nach einer Seite und wieder zurück. Es wird die Ausbiegung, die wir am oberen Ende des Fadens durch die Bewegung der Hand hervorgebracht haben, als eine Art Welle an ihm herablaufen, so daß immer tiefere und tiefere Teile des Fadens sich seitwärts ausbiegen, während die oberen wieder in die gestreckte Ruhelage zurückkehren, und doch ist es deutlich, daß, während die Welle nach unten hin abläuft, jeder einzelne Teil des Fadens nur horizontal hin und her schwanken kann, und keineswegs die abwärts schreitende Bewegung der Welle teilt.

Noch vollkommener gelingt ein solcher Versuch an einem langen elastischen, schwach gespannten Faden, z. B. einer dicken Kautschukschnur, oder einer Messingspiralfeder von 8 bis 12 Fuß Länge, deren eines Ende befestigt ist, während man das andere in der Hand hält. Die Hand kann hier leicht Wellen erregen, welche in sehr regelmäßiger Weise nach dem anderen Ende des Fadens ablaufen, dort reflektiert werden und wieder zurückkommen. Auch hier ist es deutlich, daß es kein Teil der Schnur selbst sein kann, welcher hin und her läuft, sondern daß immer andere und andere Teile der Schnur die fortschreitende Welle zusammensetzen. An diesen Beispielen wird der Leser sich eine Vorstellung bilden können von einer solchen Art der Bewegung, wie die des Schalles ist, bei welcher die materiellen Teilchen des bewegten Körpers nur periodische Schwingungen ausführen, während die Erschütterung selbst fortdauernd vorwärts schreitet.

Kehren wir zu der Wasserfläche zurück. Wir haben vorausgesetzt, daß ein Punkt derselben von einem Steine getroffen und erschüttert worden sei. Die Erschütterung hat sich in Form eines Wellenringes über die Wasserfläche ausgebreitet, ist zu dem schwimmenden Hölzchen gekommen und hat dieses in Schwankungen versetzt. So ist also mittels der Wellen die Erschütterung, welche der Stein an einem Punkte der Wasserfläche erregt hatte, dem Hölzchen, welches an einem anderen Punkte derselben Fläche sich befand, mitgeteilt worden. Von ganz ähnlicher Art ist der Vorgang in dem uns umgebenden Luftmeere. Statt des Steines setze man einen tönenden Körper, der die Luft erschüttert, statt des Hölzchens das menschliche Ohr, an welches die Erschütterungswellen der Luft anschlagen und dessen bewegliche Teile sie dabei in Bewegung setzen.

Die Luftwellen, welche von einem tönenden Körper ausgehen, übertragen die Erschütterung auf das menschliche Ohr gerade ebenso, wie das Wasser sie von dem Stein auf den schwimmenden Körper überträgt.

Hiernach wird es leicht ersichtlich sein, wie ein in periodischer Schwingung begriffener Körper auch die Luftteilchen in eine periodische Bewegung setzen muß. Ein fallender Stein gibt der Wasserfläche nur einen einzelnen Stoß. Nun denke man sich aber statt des einen Steines etwa eine regelmäßige Reihe von Tropfen aus einem Gefäße mit enger Mündung in das Wasser fallend. Jeder Tropfen wird eine Ringwelle erregen, jede Ringwelle wird über die Wasserfläche ganz ebenso wie ihre Vorgängerin hinlaufen, und wie sie dieser folgte, werden ihr ihre Nachfolgerinnen folgen. So wird auf der Wasserfläche eine regelmäßige Reihe konzentrischer Ringe entstehen und sich ausbreiten. So viel Tropfen in der Sekunde in das Wasser fallen, so viel Wellen werden auch in der Sekunde unser schwimmendes Hölzchen treffen, und so viel Male wird dieses auf und ab geschaukelt werden, also eine periodische Bewegung ausführen, deren Periode gleich ist den Zeitabschnitten, in denen die Tropfen fallen. In derselben Weise bringt in der Luft ein periodisch bewegter tönender Körper eine ähnliche periodische Bewegung zunächst der Luftmasse, dann des Trommelfells in unserem Ohr hervor, deren Schwingungsdauer der des tönenden Körpers gleich sein muß.

Nachdem wir die erste Haupteinteilung des Schalles in Geräusche und Klänge besprochen, und die den Klängen zukommende Luftbewegung im allgemeinen beschrieben haben, wenden wir uns zu den besonderen Eigentümlichkeiten, durch welche wiederum die Klänge sich voneinander unterscheiden. Wir kennen drei Unterschiede der Klänge, wenn wir zunächst nur an solche Klänge denken, wie sie einzeln von unseren gewöhnlichen musikalischen Instrumenten hervorgebracht werden, und Zusammenklänge verschiedener Instrumente ausschließen. Klänge können sich nämlich unterscheiden:

1. durch ihre Stärke,
2. durch ihre Tonhöhe,
3. durch ihre Klangfarbe.

Was wir unter Stärke des Tones und unter Tonhöhe verstehen, brauche ich nicht zu erklären. Unter Klangfarbe verstehen wir die-

jenige Eigentümlichkeit, wodurch sich der Klang einer Violine von dem einer Flöte, oder einer Klarinette, oder einer menschlichen Stimme unterscheidet, wenn alle dieselbe Note in derselben Tonhöhe hervorbringen.

Wir haben jetzt für diese drei Hauptunterschiede des Klanges auseinander zu setzen, welche besonderen Eigentümlichkeiten der Schallbewegung ihnen entsprechen.

Was zunächst die Stärke der Klänge betrifft, so ist es leicht zu erkennen, daß diese mit der Breite (Amplitude) der Schwingungen des tönenden Körpers wächst und abnimmt. Wenn wir eine Saite anschlagen, sind ihre Schwingungen anfangs ausgiebig genug, daß wir sie sehen können; dementsprechend ist ihr Ton anfangs am stärksten. Dann werden die sichtbaren Schwingungen immer kleiner und kleiner; in demselben Maße nimmt die Stärke des Tones ab. Dieselbe Beobachtung können wir an gestrichenen Saiten, den Zungen der Zungenpfeifen und vielen anderen tönenden Körpern machen. Die gleiche Folgerung müssen wir aus der Tatsache ziehen, daß die Stärke des Klanges abnimmt, wenn wir uns im Freien von dem tönenden Körper entfernen, während sich weder Tonhöhe noch Klangfarbe verändern. Mit der Entfernung ändert sich aber an den Luftwellen nur die Schwingungsamplitude der einzelnen Luftteilchen. Von dieser muß also die Stärke des Schalles abhängen, aber keine seiner anderen Eigenschaften [1]).

Der zweite wesentliche Unterschied verschiedener Klänge beruht in ihrer Tonhöhe. Wir wissen schon aus der täglichen Erfahrung, daß Töne gleicher Tonhöhe von den verschiedensten Instrumenten mittels der verschiedensten mechanischen Vorgänge und in der verschiedensten Stärke erzeugt werden können. Die Luftbewegungen, welche hierbei entstehen, müssen alle periodisch sein, sonst erregen sie nicht die Empfindung eines musikalischen Klanges im Ohr. Innerhalb jeder einzelnen Periode kann die Bewegung sein, von welcher Art sie will; wenn nur die Dauer der Periode zweier Klänge gleich groß ist, so haben sie gleiche Tonhöhe. Also: Die Tonhöhe hängt

[1]) Mechanisch ist die Stärke der Schwingungen für Töne verschiedener Höhe durch ihre lebendige Kraft, d. h. durch das Quadrat der größten Geschwindigkeit zu messen, welche die schwingenden Teilchen erreichen. Aber das Ohr hat verschiedene Empfindlichkeit für Töne verschiedener Höhe, so daß ein für verschiedene Tonhöhen gültiges Maß der Intensität der Empfindung hierdurch nicht gewonnen werden kann.

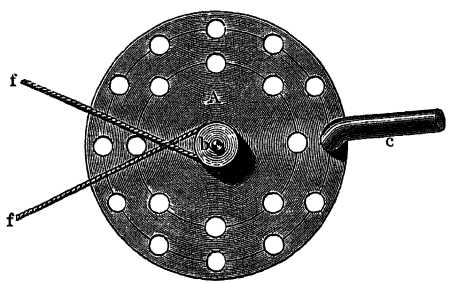
nur ab von der Schwingungsdauer oder, was gleichbedeutend ist, von der Schwingungszahl. Wir pflegen die Sekunde als Zeiteinheit zu benutzen, und verstehen deshalb unter Schwingungszahl die Anzahl der Schwingungen, welche der tönende Körper in einer Zeitsekunde ausführt. Es ist selbstverständlich, daß wir die Schwingungsdauer finden, wenn wir die Sekunde durch die Schwingungszahl dividieren.

Die Klänge sind desto höher, je größer ihre Schwingungszahl oder je kleiner ihre Schwingungsdauer ist.

Die Zahl der Schwingungen solcher elastischer Körper, welche hörbare Töne hervorbringen, genau zu bestimmen, ist ziemlich schwierig, und die Physiker mußten deshalb vielerlei verhältnismäßig verwickelte Methoden einschlagen, um diese Aufgabe in jedem einzelnen Falle lösen zu können. Die mathematische Theorie und mannigfaltige Versuche mußten sich zu dem Ende gegenseitig zu Hilfe kommen. Zur Darlegung der Grundtatsachen in diesem Gebiete ist es deshalb sehr bequem, ein besonderes Toninstrument anwenden zu können, die sogenannte Sirene, welches durch seine Konstruktion es möglich macht, die Zahl der Luftschwingungen, die den Ton hervorgebracht haben, direkt zu bestimmen. Die einfachste Form der Sirene ist in Fig. 1 nach Seebeck in ihren Hauptteilen dargestellt.

A ist eine dünne Scheibe aus Pappe oder Blech, welche um ihre mittlere Achse *b* mittels der um ein größeres Rad laufenden Schnur *ff* schnell gedreht werden kann. Längs des Randes der Scheibe ist eine Reihe von Löchern in gleichen Abständen voneinander angebracht, in der Zeichnung 12; eine oder mehrere andere Reihen gleich abstehender Löcher befinden sich auf anderen konzentrischen Kreislinien (in Fig. 1 eine solche von acht Löchern); *c* ist ein Röhrchen, welches gegen eines der Löcher gerichtet wird. Läßt man nun die Scheibe geschwind umlaufen, und bläst durch das Röhrchen *c*, so tritt die Luft frei aus, so oft eines der Löcher der Scheibe an der Mündung des Röhrchens vorbeigeht, während

Fig. 1.



der Austritt der Luft gehindert ist, so oft ein undurchbohrter Teil der Scheibe vor der Mündung des Röhrchens steht. Jedes einzelne Loch der Scheibe, welches vor der Mündung der Röhre vorübergeht, läßt daher einen einzelnen Luftstoß austreten. Wird die Scheibe einmal umgedreht, und ist das Röhrchen gegen den äußeren Kreis gerichtet, so erhalten wir den 12 Löchern entsprechend 12 Luftstöße; ist das Röhrchen dagegen gegen den inneren Kreis gerichtet, nur acht Luftstöße. Lassen wir die Scheibe in der Sekunde 10mal umlaufen, so gibt uns der äußere Kreis angeblasen 120 Luftstöße in der Sekunde, welche als ein schwacher tiefer Ton erscheinen, und der innere Kreis 80 Luftstöße. Überhaupt, wenn wir die Anzahl der Umläufe der Scheibe während einer Sekunde, und die Anzahl der Löcher der angeblasenen Reihe kennen, gibt uns offenbar das Produkt beider Zahlen die Zahl der Luftstöße. Diese Zahl ist also hier viel leichter genau zu ermitteln als bei irgend einem anderen Tonwerkzeuge, und die Sirenen sind deshalb außerordentlich geeignet, um alle Veränderungen des Tones zu studieren, welche von den Veränderungen und den Verhältnissen der Schwingungszahlen abhängen.

Die hier beschriebene Form der Sirene gibt nur einen schwachen Ton; ich habe sie nur vorangestellt, weil die Art ihrer Wirkung am leichtesten zu verstehen ist, auch kann sie leicht, indem man die Scheibe wechselt, sehr verschiedenartigen Versuchen angepaßt werden. Einen kräftigeren Ton gibt die in Fig. 2, 3 und 4 dargestellte Sirene nach Cagniard la Tour. *SS* ist die rotierende Scheibe, in Fig. 3 von oben gesehen, in Fig. 2 und 4 von der Seite. Sie befindet sich über einem Windkasten *A*, der durch das Rohr *B* mit einem Blasebalg verbunden werden kann. Der Deckel des Windkastens *A*, der unmittelbar unter der rotierenden Scheibe liegt, hat ebenso viele Durchbohrungen wie diese, und die Durchbohrungen im Deckel des Kastens und in der Scheibe sind so schräg gegeneinander gerichtet, wie Fig. 4 zeigt (Fig. 4 ist ein Durchschnitt des Instrumentes in Richtung der Linie *nn* Fig. 3). Diese Stellung der Löcher bewirkt, daß der ausfahrende Wind die Scheibe *SS* selbst in Rotation versetzt, und man kann durch starkes Anblasen 50 bis 60 Rotationen in der Sekunde erzielen. Da sämtliche Löcher dieser Sirene gleichzeitig angeblasen werden, so erhält man einen viel stärkeren Ton als bei der Sirene von Seebeck. Zur Zählung der Umdrehungen dient das

Zählerwerk $z\,z$, an dem sich ein gezahntes Rad befindet, welches in die Schraube t eingreift und bei jeder Umdrehung der Scheibe $S\,S$ um einen Zahn vorwärts bewegt wird. Durch den Griff h kann man das Zählerwerk ein wenig verschieben, so daß es in die Schraube t nach Belieben eingreift oder nicht eingreift. Wenn man es bei einem

Fig. 2.

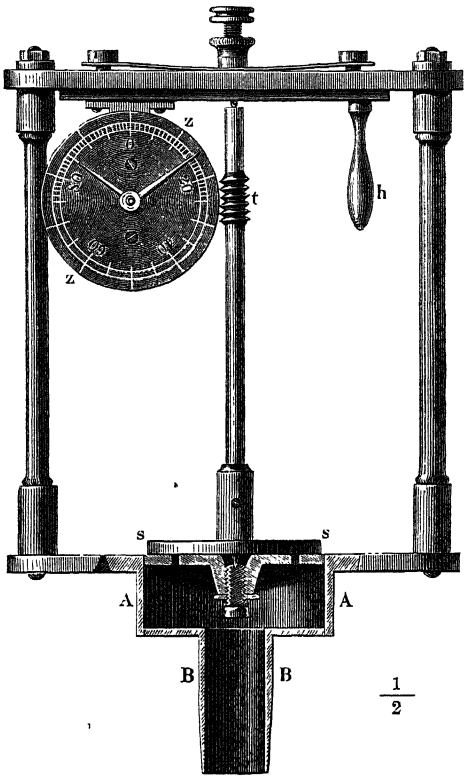


Fig. 3.

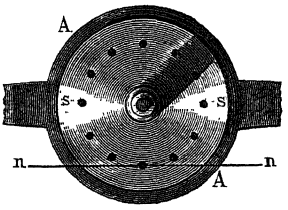
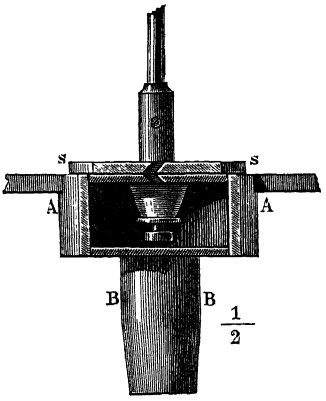


Fig. 4.



Sekundenschlage einrückt, bei einem späteren ausrückt, zeigen die Zeiger an, wie viel Umläufe die Scheibe während der abgezählten Sekunden gemacht hat [1]).

Dove hat dieser Sirene mehrere Reihen von Löchern gegeben, zu denen der Wind beliebig zugelassen oder abgesperrt werden kann. Eine solche mehrstimmige Sirene mit noch anderen besonderen Einrichtungen wird im achten Abschnitt abgebildet und beschrieben werden.

[1]) Siehe Beilage I.

Zunächst ist klar, daß, wenn die durchbohrte Scheibe einer dieser Sirenen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit umläuft und die Luft stoßweise durch die Löcher ausströmt, die dadurch hervorgebrachte Bewegung der Luft periodisch ist in dem Sinne, wie wir dieses Wort gebraucht haben. Die Löcher haben gleiche Abstände voneinander, sie folgen sich also bei der Umdrehung in gleichen Zeiträumen. Durch jedes Loch wird gleichsam ein Tropfen Luft in das äußere Luftmeer ausgeleert und erregt hier Wellen, die ebenfalls in gleichen Zwischenzeiten sich folgen, gerade ebenso wie es regelmäßig fallende Tropfen auf einer Wasserfläche tun. Innerhalb jeder einzelnen Periode wird bei verschieden eingerichteten Sirenen jeder einzelne Luftstoß noch eine ziemlich verschiedene Form haben können, je nachdem die Löcher enger oder weiter, näher aneinander oder entfernter sind, und je nachdem die Röhrenmündung gestaltet ist; aber jedenfalls werden sämtliche Luftstöße derselben Löcherreihe, solange man die Geschwindigkeit der Drehung und die Stellung des Röhrchens unverändert läßt, eine regelmäßig periodische Luftbewegung geben und deshalb im Ohr die Empfindung eines musikalischen Klanges erregen müssen, was denn auch der Fall ist.

Es ergibt sich bei den Versuchen mit der Sirene zunächst leicht, daß zwei Löcherreihen von gleicher Anzahl der Löcher, mit derselben Geschwindigkeit gedreht, einen Klang von derselben Tonhöhe geben, wie auch immer die Größe und Form der Löcher oder des Röhrchens sein mag, ja daß wir denselben Ton sogar erhalten, wenn wir bei der Drehung der Scheibe einen Stift in die Löcher schlagen lassen, statt sie anzublasen. Daraus folgt also zunächst, daß die musikalische Höhe des Klanges nur abhängt von der Zahl der Luftstöße oder Schwingungen, nicht von ihrer Form, Stärke oder Erregungsweise. Weiter ergibt sich mit diesem Instrumente sehr leicht, daß, wenn wir die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe steigern, womit natürlich auch die Anzahl der Luftstöße gesteigert wird, der Ton an Höhe zunimmt. Dasselbe geschieht, wenn wir bei unveränderter Umlaufsgeschwindigkeit erst eine Reihe Löcher von kleinerer Anzahl anblasen, dann eine von größerer. Die letztere gibt den höheren Ton.

Mit demselben Instrument findet man nun auch sehr leicht die merkwürdige Beziehung, welche die Schwingungszahlen zweier Töne

haben, die miteinander ein konsonierendes Intervall bilden. Man nehme eine Scheibe mit einer Reihe von 8, und einer von 16 Löchern, und blase sie gleichzeitig an, während die Umlaufsgeschwindigkeit der Scheibe konstant erhalten wird. Man wird zwei Töne hören, die genau im Verhältnis einer Oktave zueinander stehen. Man steigere die Umlaufsgeschwindigkeit der Scheibe; beide Töne werden höher geworden sein, aber beide werden auch in der neuen Tonlage miteinander eine Oktave bilden. Daraus folgern wir, daß ein Ton, der die höhere Oktave eines anderen bildet, genau doppelt so viel Schwingungen in gleicher Zeit macht, als der letztere.

Die oben in Fig. 1 abgebildete Scheibe hat zwei Reihen von 8 und 12 Löchern. Beide abwechselnd angeblasen geben zwei Töne, die eine genaue und reine Quinte miteinander bilden, welches auch die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe sein mag. Daraus folgt, daß zwei Töne im Verhältnis einer Quinte stehen, wenn der höhere drei Schwingungen macht, genau in derselben Zeit, wo der tiefere zwei macht.

Wenn ein Ton auf der Reihe von 8 Löchern angeblasen wird, brauchen wir 16 Löcher, um seine Oktave, 12 Löcher, um seine Quinte zu erhalten. Das Schwingungsverhältnis der Quinte zur Oktave ist also 12:16 oder 3:4, das Intervall zwischen Quinte und Oktave ist aber eine Quarte, und daraus ersehen wir, daß zwei Töne miteinander eine Quarte bilden, wenn der höhere vier Schwingungen in derselben Zeit ausführt, wo der tiefere drei macht.

Die mehrstimmige Sirene von Dove hat gewöhnlich vier Reihen von 8, 10, 12, 16 Löchern. Die Reihe von 16 Löchern gibt die Oktave der von 8, die Quarte der von 12 Löchern, die Reihe von 12 Löchern gibt die Quinte der von 8, die kleine Terz der von 10 Löchern, die letztere die große Terz der von 8 Löchern. Die vier Reihen geben also die Töne eines Dur-Akkords.

Durch diese und ähnliche Versuche ergeben sich folgende Verhältnisse der Schwingungszahlen:

1:2 Oktave,
2:3 Quinte,
3:4 Quarte,
4:5 große Terz,
5:6 kleine Terz.

Wenn man den Grundton eines gegebenen Intervalles eine Oktave höher verlegt, so heißt dies das Intervall umkehren. So ist die Quarte die umgekehrte Quinte, die kleine Sexte die umgekehrte große Terz, die große Sexte die umgekehrte kleine Terz. Das entsprechende Schwingungsverhältnis ergibt sich demnach, indem man die kleinere Zahl des ursprünglichen Intervalles verdoppelt.

Aus 2:3 der Quinte ..... 3: 4 die Quarte,
aus 4:5 der großen Terz 5: 8 die kleine Sexte,
aus 5:6 der kleinen Terz 6:10 = 3:5 die große Sexte.

Das sind sämtliche konsonierende Intervalle, die innerhalb einer Oktave liegen. Ihre Schwingungsverhältnisse sind, mit Ausnahme der kleinen Sexte, die in der Tat die unvollkommenste Konsonanz unter den genannten bildet, alle ausgedrückt durch die ganzen Zahlen 1 bis 6.

So findet man durch verhältnismäßig einfache und leichte Versuche an der Sirene gleich das merkwürdige Gesetz, welches wir in der Einleitung erwähnt haben, bestätigt, wonach die Schwingungszahlen konsonanter Töne im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen stehen. Wir werden im Verlaufe unserer Untersuchung dasselbe Instrument wieder gebrauchen, um die Strenge und Genauigkeit dieses Gesetzes noch eingehender zu prüfen.

Längst bevor man noch irgend etwas von Schwingungszahlen und deren Messung wußte, hatte Pythagoras gelehrt, daß man eine Saite durch einen Steg im Verhältnis der genannten ganzen Zahlen teilen muß, wenn ihre beiden Abschnitte konsonante Töne geben sollen. Setzt man den Steg so, daß rechts $^2/_3$ der Saite stehen bleiben, links $^1/_3$, so stehen die beiden Längen im Verhältnis 2:1 und geben das Intervall einer Oktave; das längere Saitenstück hat dabei den tieferen Ton. Setzt man den Steg so, daß rechts $^3/_5$, links $^2/_5$ der Länge liegen, so ist das Verhältnis der Stücke 3:2 und die Töne bilden eine Quinte.

Diese Abmessungen sind von den griechischen Musikern schon mit großer Genauigkeit ausgeführt worden, und sie hatten auf sie ein ziemlich künstliches Tonsystem gegründet. Zu diesen Messungen benutzte man ein besonderes Instrument, das Monochord, an welchem auf einem Resonanzkasten eine einzige Saite ausgespannt war; unter dieser befand sich ein Maßstab, um den Steg richtig setzen zu können.

Erst sehr viel später lernte man durch Galilei (1638), Newton, Euler (1729) und Daniel Bernouilli (1771) die Bewegungsgesetze der Saiten kennen und ermittelte, daß die einfachen Verhältnisse der Saitenlängen auch ebenso für die Schwingungszahlen der Töne bestehen und somit den Tonintervallen aller musikalischen Instrumente zukommen, und nicht allein denen der Saiten, an welchen man ursprünglich das Gesetz gefunden hatte.

Diese Beziehung der ganzen Zahlen zu den musikalischen Konsonanzen erschien von jeher als ein wunderbares und bedeutsames Geheimnis. Schon die Pythagoreer beuteten sie aus in ihren Spekulationen über die Harmonie der Sphären. Sie blieb von da ab teils das Ziel, teils der Ausgangspunkt der wunderlichsten und kühnsten phantastischen oder philosophischen Kombinationen, bis in neuerer Zeit die meisten Forscher sich der auch von Euler vertretenen Ansicht anschlossen, daß die menschliche Seele ein besonderes Wohlgefallen an einfachen Verhältnissen habe, weil sie diese leichter auffassen und übersehen könne. Aber es blieb unerörtert, wie es die Seele eines nicht in der Physik bewanderten Hörers, der sich vielleicht nicht einmal klar gemacht hat, daß Töne auf Schwingungen beruhen, anstelle, um die Verhältnisse der Schwingungszahlen zu erkennen und zu vergleichen. Nachzuweisen, welche Vorgänge im Ohr den Unterschied von Konsonanz und Dissonanz fühlbar machen, wird eine Hauptaufgabe der zweiten Abteilung dieses Buches sein.

Berechnung der Schwingungszahlen für sämtliche Töne der Tonleiter.

Mittels der angegebenen Verhältnisse für die konsonanten Intervalle lassen sich die Schwingungszahlen leicht für die ganze Ausdehnung der Tonleiter berechnen, indem wir der Reihe der konsonanten Intervalle durch die Tonleiter hin folgen.

Der Durdreiklang besteht aus der großen Terz und Quinte. Seine Verhältnisse sind:

$$C : E : G$$
$$1 : {}^5/_4 : {}^3/_2 \quad \text{oder}$$
$$4 : 5 : 6.$$

Wenn wir zu diesem Dreiklang noch den der Dominante $G : H : D$ und den der Unterdominante $F : A : C$ hinzunehmen, die

beide je einen Ton mit dem Dreiklang der Tonika *C* gemein haben, so erhalten wir sämtliche Töne der *C*-dur-Leiter und folgende Verhältnisse:

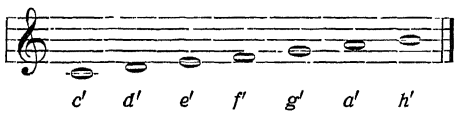
$$C : D : E : F : G : A : H : C.$$
$$1 : \tfrac{9}{8} : \tfrac{5}{4} : \tfrac{4}{3} : \tfrac{3}{2} : \tfrac{5}{3} : \tfrac{15}{8} \quad 2$$

Um die Rechnung auf andere Oktaven ausdehnen zu können, bemerken wir zunächst über die Bezeichnung der Töne folgendes. Die deutschen Meister bezeichnen die Töne der höheren Oktaven durch angehängte Striche wie folgt:

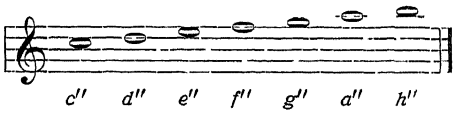
1. Ungestrichene oder kleine Oktave
(vierfüßige Oktave der Orgel).



2. Eingestrichene Oktave (zweifüßig).

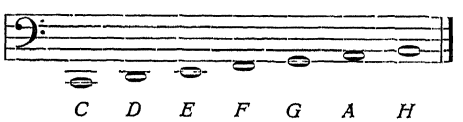


3. Zweigestrichene Oktave (einfüßig).



Nach demselben Prinzip geht es weiter in die Höhe. Unterhalb der kleinen Oktave liegt die mit großen ungestrichenen Buchstaben bezeichnete große Oktave, deren *C* eine achtfüßige offene Orgelpfeife erfordert, daher die achtfüßige genannt.

4. Große oder achtfüßige Oktave.



Unter dieser folgt die 16füßige oder Kontra-Oktave, die tiefste des Klaviers und der meisten Orgeln, deren Töne wir mit $C_I D_I E_I F_I G_I A_I H_I$ bezeichnen wollen. Endlich wird auf großen Orgeln auch wohl noch eine 32füßige tiefere Oktave C_{II} bis H_{II} ausgeführt, deren Klänge aber kaum noch den Charakter eines musikalischen Tones haben.

Da die Schwingungszahlen der nächst höheren Oktave stets doppelt so groß sind als die der tieferen, so findet man die Schwingungszahlen der höheren Töne, wenn man die der kleinen ungestrichenen Oktave so oft mit 2 multipliziert, als ihr Zeichen Striche oben hat, die der tieferen dagegen, wenn man die Schwingungszahlen der großen Oktave so oft mit 2 dividiert, als das Zeichen des Tones unten Striche hat.

So ist

$$c'' = 2 \times 2 \times c = 2 \times 2 \times 2\ C$$
$$C_{II} = 1/2 \times 1/2 \times C = 1/2 \times 1/2 \times 1/2\ c.$$

Für die Tonhöhe der musikalischen Skala wird von den deutschen Physikern meistens die von Scheibler gegebene und darauf von der Deutschen Naturforscherversammlung zu Stuttgart im Jahre 1834 genehmigte Bestimmung festgehalten, daß das eingestrichene A in der Sekunde 440 Schwingungen zu machen habe[1]). Daraus ergibt sich nun für die C-dur-Tonleiter die umstehend folgende Tabelle, welche dazu dienen möge, die Tonhöhe zu bestimmen für Töne, welche in den folgenden Abschnitten dieses Buches durch ihre Schwingungszahl definiert sind.

---

[1]) Im Jahre 1859 hat die Pariser Akademie für denselben Ton 435 Schwingungen festgesetzt. In französischer Zählungsweise werden diese als 870 Schwingungen bezeichnet, da die französischen Physiker unzweckmäßigerweise den Hin- und Hergang eines schwingenden Körpers als zwei Schwingungen bezeichnen, den Hingang als eine, den Hergang als die zweite. Diese Art zu zählen, ist vom Sekundenpendel entnommen, welches beim Hingang einmal und beim Rückgang ein zweites Mal schlägt. Für symmetrisch hin und her gehende Bewegungen wäre es gleichgültig, wie man zählt, aber bei den vielfältig vorkommenden asymmetrischen Bewegungen ist die französische Zählungsweise sehr hinderlich. Die Zahl 440 gibt weniger Brüche für die C-dur-Leiter als das $a' = 435$. Der Unterschied der Stimmung ist weniger als ein Komma.

[Auf der internationalen Stimmtonkonferenz in Wien im Jahre 1885 wurden für den Normalstimmton 435 Schwingungen international festgesetzt. (Anm. d. Her. 1895.)]

Noten	Kontra Oktave C_1—H_1	Große Oktave C—H	Ungestrichene Oktave c—h	Eingestrichene Oktave c'—h'	Zweigestrichene Oktave c''—h''	Dreigestrichene Oktave c'''—h'''	Viergestrichene Oktave c''''—h''''
C	33	66	132	264	528	1056	2112
D	37,125	74,25	148,5	297	594	1188	2376
E	41,25	82,5	165	330	660	1320	2640
F	44	88	176	352	704	1408	2816
G	49,5	99	198	396	792	1584	3168
A	55	110	220	440	880	1760	3520
H	61,875	123,75	247,5	495	990	1980	3960

Der tiefste Ton der Orchesterinstrumente ist das E_I des Kontrabasses mit $41^1/_2$ Schwingungen. Die neueren Klaviere und Orgeln gehen gewöhnlich bis zum C_I mit 33 Schwingungen, neuere Flügel auch wohl bis zum A_{II} mit $27^1/_2$ Schwingungen. Auf größeren Orgeln hat man auch noch eine tiefere Oktave bis zum C_{II} mit $16^1/_2$ Schwingungen, wie schon erwähnt ist. Aber der musikalische Charakter aller dieser Töne unterhalb des E_I ist unvollkommen, weil wir hier schon der Grenze nahe sind, wo die Fähigkeit des Ohres, die Schwingungen zu einem Tone zu verbinden, aufhört. Wenn nicht die Auffassung der Tonhöhe unbestimmt werden soll, können diese tiefsten Töne deshalb auch nur mit ihren höheren Oktaven zusammen musikalisch gebraucht werden, wodurch die letzteren den Charakter größerer Tiefe bekommen.

Nach der Höhe gehen die Pianofortes meist bis zum a^{IV} oder auch c^V von 3520 und 4224 Schwingungen, der höchste Ton des Orchesters möchte das 5gestrichene d^5 von 4752 Schwingungen auf der Pikkoloflöte sein. Appun und W. Preyer haben durch kleine Stimmgabeln, die mit dem Violinbogen gestrichen wurden, neuerdings das 8gestrichene e von 40960 Schwingungen erreicht und gehört. Diese hohen Töne waren sehr schmerzhaft unangenehm, und die Unterscheidung der Tonhöhe ist bei denen, die über die Grenze der musikalischen Skala hinausliegen, sehr unvollkommen. Mehr darüber im neunten Abschnitt.

Die musikalisch gut brauchbaren Töne mit deutlich wahrnehmbarer Tonhöhe liegen also zwischen 40 und 4000 Schwingungen, im Bereiche von 7 Oktaven, die überhaupt wahrnehmbaren zwischen

etwa 20 und 40000, im Bereiche von etwa 11 Oktaven. Man sieht hieraus, ein wie großer Umfang von verschiedenen Werten der Schwingungszahlen vom Ohr wahrgenommen und unterschieden werden kann. Hierin ist das Ohr dem Auge, welches Licht von verschiedener Schwingungsdauer ebenfalls als verschiedenartig unterscheidet, außerordentlich überlegen, denn der Umfang der vom Auge wahrnehmbaren Lichtschwingungen geht wenig über eine Oktave.

Stärke und Tonhöhe waren die ersten beiden Unterschiede, welche wir zwischen verschiedenen Klängen fanden, der dritte war die Klangfarbe, zu deren Untersuchung wir nun zu schreiten haben. Wenn man nacheinander dieselbe Note von einem Klavier, einer Violine, einer Klarinette, Oboe, Trompete und einer menschlichen Stimme angegeben hört, so ist trotz gleicher Stärke und gleicher Tonhöhe der Klang aller dieser Instrumente verschieden, und wir erkennen an dem Klange mit der größten Leichtigkeit das Instrument wieder, welches ihn hervorgebracht hat. Die Abänderungen der Klangfarbe erscheinen unendlich mannigfaltig, denn abgesehen davon, daß wir noch eine lange Reihe von verschiedenen musikalischen Instrumenten haben, die alle dieselbe Note würden hervorbringen können, abgesehen davon, daß die verschiedenen Exemplare desselben Instrumentes und die Stimmen verschiedener menschlicher Individuen noch gewisse feinere Abänderungen der Klangfarbe zeigen, die unser Ohr unterscheidet, kann dieselbe Note zuweilen selbst auf demselben Instrument noch mit mancherlei Abänderungen der Klangfarbe hervorgebracht werden. Unter den musikalischen Instrumenten sind in dieser Beziehung namentlich die Streichinstrumente ausgezeichnet. Noch reicher ist die menschliche Stimme, und die menschliche Sprache benutzt eben diese Abänderungen der Klangfarbe, um die verschiedenen Buchstaben zu charakterisieren. Als anhaltende, musikalisch verwendbare Klänge der Stimme sind hier namentlich die verschiedenen Vokale zu nennen, während die Bildung der Konsonanten meistens auf kurz vorübergehenden Geräuschen beruht.

Wenn wir nun fragen, welcher äußeren physikalischen Verschiedenheit der Schallwellen die verschiedenen Klangfarben entsprechen, so haben wir gesehen, daß die Weite der Schwingung der Stärke, die Dauer der Schwingung der Tonhöhe entspricht. Von beiden kann die Klangfarbe nicht abhängig sein. Dann bleibt keine

andere Möglichkeit übrig, als daß die Klangfarbe abhänge von der Art und Weise, wie die Bewegung innerhalb jeder einzelnen Schwingungsperiode vor sich geht. Wir haben zur Erzeugung eines musikalischen Klanges von der Bewegung des tönenden Körpers nur gefordert, daß sie periodisch sei, d. h. daß innerhalb jeder Schwingungsperiode genau dasselbe geschehe, was in den vorausgegangenen Perioden eben geschehen ist. Welche Art von Bewegung innerhalb jeder einzelnen Periode vor sich geht, war ganz beliebig geblieben, so daß in dieser Beziehung noch eine unendliche Mannigfaltigkeit der Schallbewegung möglich bleibt.

Betrachten wir Beispiele, und zwar zuerst solcher periodischer Bewegungen, die langsam genug gehen, daß wir ihnen mit dem Auge folgen können. Nehmen wir zuerst ein Pendel, wie wir es uns jederzeit verfertigen können, indem wir einen schweren Körper an einem Faden aufhängen und in Bewegung setzen. Das Pendel schwankt von rechts nach links in gleichmäßiger, nirgends stoßweise unterbrochener Bewegung, nahe den beiden Enden seiner Bahn bewegt es sich langsam, in der Mitte schnell. Unter den tönenden Körpern, welche in derselben Weise sich bewegen, nur viel schneller, wären die Stimmgabeln zu nennen. Wenn man eine Stimmgabel entweder angeschlagen oder durch Streichen mit dem Violinbogen erregt hat, und sie nun langsam austönen läßt, bewegen sich ihre Zinken genau in derselben Weise und nach demselben Gesetze hin und her wie ein Pendel, nur daß sie viele hundert Schwingungen in derselben Zeit vollführen, wo letzteres eine macht.

Ein anderes Beispiel einer periodischen Bewegung wäre ein Hammer, der von einer Wassermühle bewegt wird. Er wird langsam von dem Mühlwerk gehoben, dann losgelassen und fällt plötzlich herunter, wird dann wieder langsam gehoben, usf. Hier haben wir es wieder mit einem periodischen Hin- und Hergang zu tun, aber es ist ersichtlich, daß die Art dieser Bewegung eine ganz andere ist als die des Pendels. Unter den tönenden Bewegungen würde diesem Falle nahe entsprechen die Bewegung einer Violinsaite, die vom Bogen gestrichen wird, wie wir es im fünften Abschnitt genauer beschreiben werden. Die Saite haftet eine Zeitlang am Bogen fest, wird von diesem mitgenommen, bis sie sich plötzlich losreißt, wie der Hammer in der Mühle, und nun wie dieser mit viel größerer

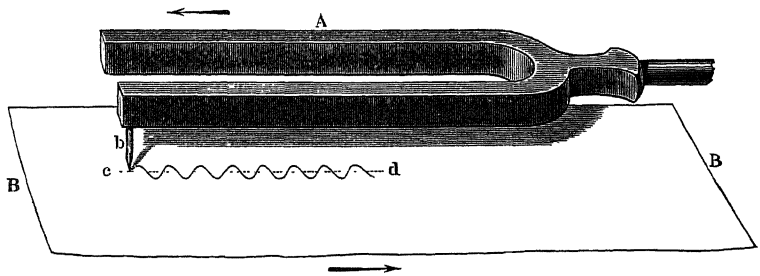
Geschwindigkeit, als sie gekommen ist, ein Stück zurückspringt, wo sie dann von neuem durch den Bogen gefaßt und mitgenommen wird.

Man denke ferner an einen Ball, der, senkrecht in die Höhe geworfen, beim Herabfallen von dem Ballschläger mit einem Schlag empfangen wird, so daß er wieder ebenso hoch hinaufsteigt als vorher, was sich dann immer in gleichen Zeitabschnitten wiederholen mag. Ein solcher Ball würde zum Aufsteigen so viel Zeit brauchen wie zum Absteigen, seine Bewegung würde am tiefsten Punkte seiner Bahn ruckweise unterbrochen, oben aber von immer langsamerem Aufsteigen in allmählich zunehmendes Absteigen übergehen. Dies wäre also eine dritte Art einer hin und her gehenden periodischen Bewegung, deren Verlauf sich aber von den beiden früheren wesentlich unterscheidet.

Um das Gesetz solcher Bewegungen dem Auge übersichtlicher darzulegen, als es durch weitläufige Beschreibungen geschehen kann, pflegen die Mathematiker und Physiker eine graphische Methode anzuwenden, die auch wir noch oft zu benutzen gezwungen sein werden, und deren Sinn ich deshalb hier auseinander setzen muß.

Um diese Methode verständlich zu machen, wollen wir voraussetzen, daß an der Gabel *A*, Fig. 5, ein Stiftchen *b* befestigt sei,

Fig. 5.



welches auf der Papierfläche *BB* zeichnen könne. Es möge entweder die Gabel mit gleichförmiger Geschwindigkeit in Richtung des oberen Pfeiles über das Papier hingeschoben, oder das Papier in entgegengesetzter Richtung, nämlich in Richtung des unteren Pfeiles, unter ihr fortgezogen werden, so daß die Gabel, wenn sie bei dieser Bewegung nicht tönend ist, gerade die punktierte Linie *dc* aufschreibt. Wird nun aber die Gabel über das Papier in derselben Weise hin-

geführt, während ihre Zinken dabei in Schwingung versetzt sind, so wird sie die Wellenlinie *cd* auf das Papier schreiben. Wenn sie nämlich schwingt, wird das Ende ihrer Zinke mit dem Stiftchen *b* fortdauernd hin und her gehen und sich bald über, bald unter der punktierten Linie *cd* befinden, wie es die aufgezeichnete Wellenlinie anzeigt. Diese Linie, nachdem sie auf das Papier gezeichnet ist, bleibt stehen als ein Bild von derjenigen Art der Bewegung, welche das Ende der Gabel während der tönenden Schwingungen ausgeführt hat. Da nämlich das Stiftchen *b* in Richtung der Geraden *cd* mit konstanter Geschwindigkeit sich verschoben hat, so entsprechen gleiche Abschnitte der Linie *cd* gleichen kleinen Zeitabschnitten dieser Bewegung, und die Entfernung der Wellenlinie nach oben oder unten von der betreffenden Stelle der Linie *cd* zeigt an, um wieviel in den betreffenden Zeitabschnitten das Stiftchen *b* nach oben oder unten aus seiner Gleichgewichtslage abgewichen war.

Wenn ein solcher Versuch, wie er hier angedeutet ist, wirklich ausgeführt werden soll, so tut man am besten, das Papier über einen Zylinder zu ziehen, der durch ein Uhrwerk in gleichförmige Rotation versetzt wird. Nachdem das Papier angefeuchtet ist, läßt man es über einer Terpentinölflamme umlaufen, so daß es sich mit Ruß bezieht; dann kann man mit einem feinen, etwas abgerundeten Stahlspitzchen leicht feine Striche darauf ziehen. Fig. 6 ist die Kopie

Fig. 6.

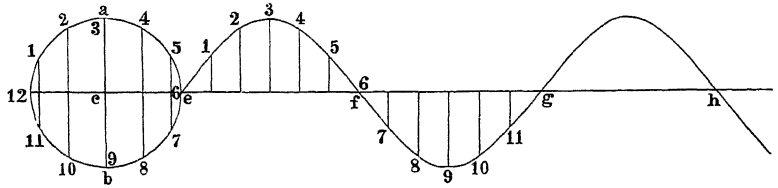


einer Zeichnung, die in dieser Weise von einer Stimmgabel auf dem rotierenden Zylinder des Phonautographen der Herren Scott und König ausgeführt ist.

Die Fig. 7 stellt einen Teil derselben Kurve in vergrößertem Maßstabe dar. Die Bedeutung einer solchen Kurve ist leicht einzusehen. Der Zeichenstift ist in Richtung der Linie *eh* mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortgeglitten. Nehmen wir an, er habe für das Stück *eg* $^1/_{10}$ Sekunde gebraucht, teilen wir *eg* in 12 gleiche Teile, wie es in der Zeichnung geschehen ist, so wird der Zeichenstift, um die Breite eines solchen Teiles in horizontaler Richtung zurückzulegen, die Zeit von $^1/_{120}$ Sekunde gebraucht haben, und die

Kurve zeigt uns an, auf welcher Seite und wie weit entfernt von der Ruhelage der schwingende Stift nach $^1/_{120}$, $^2/_{120}$ usw. Sekunde, oder überhaupt nach jeder beliebigen kurzen Zeitdauer von dem Augenblicke an gerechnet sich befand, wo er durch den Punkt *e* ging. Wir sehen, daß er nach $^1/_{120}$ Sekunde um die Höhe 1 nach oben abgewichen war, daß seine Abweichung zunahm bis $^3/_{120}$ Sekunde, dann wieder abnahm, daß er nach $^6/_{120} = {}^1/_{20}$ Sekunde wieder in seiner Gleichgewichtslage war, dann nach der entgegengesetzten Seite abwich usw. Und wir können auch weiter leicht bestimmen, wo der schwingende Stift nach einem beliebigen Bruchteile dieser Hundertzwanzigteile einer Sekunde sich befand. Eine solche Zeichnung zeigt also unmittelbar, an welcher Stelle seiner Bahn sich der schwingende Körper in jedem beliebig gewählten Zeitmoment befand, und gibt somit ein

Fig. 7.



vollständiges Bild seiner Bewegung. Will der Leser die Bewegung des schwingenden Punktes sich reproduzieren, so schneide er sich in ein Blatt Papier einen senkrechten schmalen Schlitz, lege das Papier über Fig. 6 oder 7, so daß er durch den senkrechten Schlitz einen kleinen Teil der Kurve sieht, und ziehe nun das Buch unter dem Papier langsam fort, so wird der weiße oder schwarze Punkt in dem Schlitz gerade so hin und her gehen, nur langsamer, als es ursprünglich die Gabel getan hat.

Nun können wir nicht alle schwingenden Körper ihre Schwingungen direkt auf Papier schreiben lassen, obgleich in den hierzu dienenden Methoden neuerdings manche Fortschritte gemacht sind. Aber wir können doch für alle tönenden Körper solche Kurven zeichnen, welche graphisch in derselben Weise ihre Bewegung darstellen, wenn wir das Gesetz dieser Bewegung kennen, d. h. wenn wir wissen, wie weit von seiner Gleichgewichtslage der schwingende Punkt in jedem beliebig gewählten Zeitpunkte gewesen ist. Denn tragen wir auf einer Horizontallinie wie *ef*, Fig. 7, Längen auf, welche

die Zeitdauer darstellen, und senkrecht dazu nach oben oder nach unten hin Lote, welche der Entfernung des schwingenden Punktes von seiner Mittellage gleich oder proportional sind: so erhalten wir, indem wir die Enden der Lote verbinden, eine Kurve, wie sie der schwingende Körper gezeichnet haben würde, wenn es möglich gewesen wäre, ihn zeichnen zu lassen.

So stellt Fig. 8 die Bewegung des vom Wasserrade gehobenen Hammers oder des vom Violinbogen angegriffenen Punktes der Saite dar; während der ersten neun Zeitteile steigt er langsam und gleichmäßig empor, während des zehnten springt er plötzlich herab.

Fig. 8.

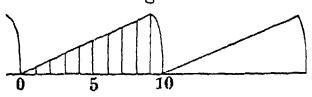


Fig. 9.

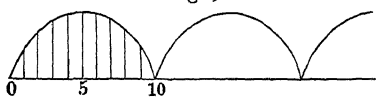


Fig. 9 stellt die Bewegung des Balles dar, der, wenn er unten angekommen ist, wieder in die Höhe geschlagen wird. Aufsteigen und Absteigen geschieht gleich schnell, während in Fig. 8 ersteres langsamer vor sich geht. Nur am tiefsten Punkte der Bahn wird die Bewegung durch den Schlag plötzlich geändert.

Indem die Physiker diese Kurvenformen im Sinne haben, welche das Gesetz der Bewegung des tönenden Körpers darstellen, sprechen sie denn auch geradezu von der Schwingungsform eines tönenden Körpers, und behaupten, daß von dieser Schwingungsform die Klangfarbe abhänge. Diese Behauptung, welche sich bisher nur darauf gründete, daß man wußte, die Klangfarbe könne nicht von der Schwingungsdauer und nicht von der Schwingungsbreite oder -stärke abhängen, werden wir in der Folge einer näheren Prüfung unterwerfen. Sie wird sich insoweit als richtig erweisen, daß jede verschiedene Klangform eine verschiedene Schwingungsform verlangt, dagegen verschiedene Schwingungsformen gleicher Klangfarbe entsprechen können.

Wenn wir die Einwirkung verschiedener Wellenformen, z. B. der in Fig. 8 gezeichneten, die etwa der Violinsaite entspricht, auf das Ohr genau und aufmerksam untersuchen, so ergibt sich eine sonderbare und unerwartete Tatsache, welche zwar lange genug einzelnen Musikern und Physikern bekannt gewesen ist, aber meistens nur als

ein Kuriosum betrachtet wurde, da man ihre Allgemeinheit und ihre große Bedeutung für alle Klangerscheinungen nicht kannte. Das Ohr, von solchen Schwingungen getroffen, hört nämlich bei gehörig angestrengter Aufmerksamkeit nicht nur denjenigen Ton, dessen Tonhöhe durch die Dauer der Schwingungen in der Weise bestimmt ist, wie wir dies vorher auseinander gesetzt haben, sondern es hört außer diesem noch eine ganze Reihe höherer Töne, welche wir die harmonischen Obertöne des Klanges nennen, im Gegensatz zu jenem ersten Ton, dem Grundton, der unter ihnen allen der tiefste und in der Regel auch der stärkste ist, und nach dessen Tonhöhe wir die Tonhöhe des ganzen Klanges beurteilen. Die Reihe dieser Obertöne ist für alle musikalischen Klänge, die einer regelmäßig periodischen Luftbewegung entsprechen, genau dieselbe; es sind nämlich folgende:

1. Die höhere Oktave des Grundtones, welche doppelt soviel Schwingungen macht, als der Grundton. Nennen wir den Grundton *c*, so ist diese höhere Oktave *c'*;

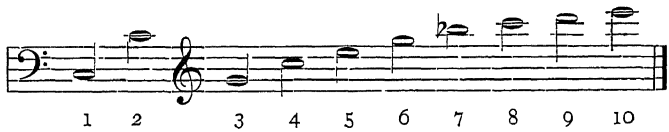
2. die Quinte dieser Oktave *g'* macht dreimal soviel Schwingungen als der Grundton;

3. die zweite höhere Oktave *c''* macht viermal soviel Schwingungen;

4. die große Terz dieser Oktave *e''* mit fünfmal soviel Schwingungen;

5. die Quinte dieser Oktave *g''* mit sechsmal soviel Schwingungen.

Daran schließen sich, immer schwächer und schwächer werdend, die Töne, welche sieben-, acht-, neunmal usw. soviel Schwingungen als der Grundton machen. Also in Notenschrift:



Die Ziffern unter den Linien bezeichnen, wievielmal die Schwingungszahl größer ist, als die des Grundtones.

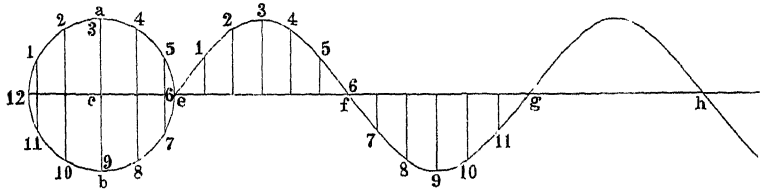
Wir haben die Gesamtempfindung, welche eine periodische Lufterschütterung im Ohr hervorbringt, Klang genannt. Jetzt finden wir eine Reihe verschiedenartiger Töne in ihm enthalten, die wir die Teiltöne oder Partialtöne des Klanges nennen wollen. Der erste dieser Teiltöne ist der Grundton des Klanges, die übrigen seine harmonischen Obertöne. Die Ordnungszahl jedes Partialtones

gibt an, wievielmal größer seine Schwingungszahl ist, als die des Grundtones. Es macht also der zweite Teilton zweimal soviel Schwingungen, der dritte dreimal soviel Schwingungen als der Grundton usw.

Es ist zuerst von G. S. Ohm ausgesprochen und behauptet worden, daß es nur eine einzige Schwingungsform gibt, deren Klang keine harmonischen Obertöne enthält, deren einziger Bestandteil also der Grundton ist. Es ist dies die Schwingungsform, welche wir oben als dem Pendel und den Stimmgabeln eigentümlich beschrieben und in Fig. 6 und 7 abgebildet haben. Wir wollen sie die pendelartigen Schwingungen nennen, oder, da ihr Klang keine weitere Zusammensetzung aus verschiedenen Tönen hören läßt, die einfachen Schwingungen. In welchem Sinne nicht bloß alle anderen Klänge, sondern auch alle anderen Schwingungsformen als zusammengesetzt betrachtet werden können, wird sich später zeigen. Die Bezeichnung einfache oder pendelartige Schwingung [1]) werden wir also als

[1]) Das Gesetz dieser Schwingung läßt sich populär mittels der in Fig. 10 dargestellten Konstruktion auseinander setzen. Man denke sich einen Punkt in der um *c* beschriebenen Kreislinie mit gleichförmiger Geschwindigkeit umlaufend, und einen

Fig. 10.



Beobachter in großer Entfernung in die Verlängerung der Linie *eh* gestellt, so daß er nicht die Fläche des besagten Kreises sieht, sondern nur die Kante dieser Fläche, so wird diesem der in der Kreislinie umlaufende Punkt so erscheinen, als ob er nur längs des Durchmessers *ab* auf- und abstiege. Dieses Auf- und Absteigen würde aber genau nach dem Gesetze der pendelartigen Schwingungen geschehen. — Um diese Bewegung durch eine Kurve graphisch darzustellen, teile man die Länge *eg*, welche der Zeitdauer einer ganzen Schwingung entsprechen möge, in ebensoviel (hier 12) gleiche Teile als die Peripherie des Kreises, und mache die Lote 1, 2, 3 usw. auf den Teilpunkten der Linie *eg* der Reihe nach gleich denen, die in dem Kreise von den entsprechenden Teilpunkten 1, 2, 3 usw. gefällt sind. So erhält man die in Fig. 10 gezeichnete Kurve, welche mit der von der Stimmgabel gezeichneten, Fig. 6, der Form nach übereinstimmt, nur größere Dimensionen hat.

Mathematisch ausgedrückt ist bei der einfachen Schwingung die Entfernung des schwingenden Punktes von der Gleichgewichtslage gleich dem Sinus eines der Zeit proportional wachsenden Bogens, daher die einfachen Schwingungen auch Sinusschwingungen genannt werden.

gleichbedeutend gebrauchen. Wir beschränken ferner den Gebrauch des Wortes Ton durchaus auf den Klang einfacher Schwingungen, während bisher Ton meist in derselben Bedeutung wie Klang gebraucht worden ist. Aber es ist durchaus nötig, in der Akustik zwischen dem Klang, d. h. dem Eindruck einer periodischen Luftbewegung überhaupt, und dem Ton, dem Eindruck einer einfachen Schwingung, zu unterscheiden, und der bisherige Sprachgebrauch scheint mir diese Feststellung der Begriffe zu rechtfertigen. Wir sprechen von Tonhöhe, welche nur einem einzelnen Ton zukommen kann, während einem Klang, streng genommen, verschiedene Tonhöhen zuzuschreiben sind, seinen verschiedenen Teiltönen entsprechend. Und wir sprechen von einem Zusammenklang verschiedener Instrumente, wo das Wort Ton entschieden nicht mehr angewendet werden kann. Die hier besprochenen Tatsachen lehren, daß jeder Klang, welcher Obertöne unterscheiden läßt, wirklich schon ein Zusammenklang verschiedener Töne ist.

Da nun die Klangfarbe, wie wir gesehen haben, von der Schwingungsform abhängt, von derselben Schwingungsform aber auch das Vorkommen der Obertöne bestimmt wird, so werden wir die Frage aufwerfen müssen, inwiefern die Unterschiede der Klangfarbe etwa auf verschiedenartigen Verbindungen des Grundtones mit verschieden starken Obertönen beruhen. Es bietet sich uns durch diese Fragestellung ein Weg dar, um den Grund des bisher vollkommen rätselhaften Wesens der Klangfarbe aufhellen zu können. Dann aber müssen wir auch notwendig die Frage zu lösen versuchen, wie denn das Ohr dazu komme, jeden Klang in eine Reihe von Teiltönen zu zerlegen, und welchen Sinn diese Zerlegung habe. Dies wird das Geschäft der nächsten Abschnitte sein.

Zweiter Abschnitt.

Die Zusammensetzung der Schwingungen.

Wir sind am Ende des vorigen Abschnittes auf die merkwürdige Tatsache gestoßen, daß das menschliche Ohr unter gewissen Umständen den Klang, welchen ein einzelnes musikalisches Instrument hervorgebracht hat, zerlegt in eine Reihe von Tönen, nämlich den Grundton und verschiedene Obertöne, welche es alle einzeln empfindet. Daß das Ohr solche Töne voneinander zu scheiden weiß, welche verschiedenen Ursprung haben, also aus verschiedenen, nicht aus einem tönenden Körper hervorgegangen sind, ist uns aus der täglichen Erfahrung bekannt. Wir können in einem Konzert ohne Schwierigkeit dem melodischen Gang jeder einzelnen Instrumental- oder Vokalstimme folgen, wenn wir unsere Aufmerksamkeit auf sie allein richten, und bei etwas größerer Übung gelingt es auch, der gleichzeitigen Bewegung vieler verflochtener Stimmen zu folgen. Dasselbe gilt übrigens nicht bloß für musikalische Klänge, sondern auch für Geräusche oder für Mischungen von beiden. Wenn mehrere Menschen zugleich sprechen, so können wir im allgemeinen beliebig auf die Worte des einen oder des anderen Sprechers hinhören und sie verstehen, vorausgesetzt, daß sie nicht durch die bloße Stärke der übrigen zu sehr übertönt werden. Daraus folgt nun erstens, daß viele verschiedene Schallwellenzüge gleichzeitig durch denselben Luftraum hin sich fortpflanzen können, ohne sich gegenseitig zu stören, zweitens, daß das menschliche Ohr die Fähigkeit besitzt, die zusammengesetzte Luftbewegung, welche durch mehrere gleichzeitig wirkende Tonwerkzeuge hervorgebracht wird, in der Empfindung wieder in ihre einfachen Bestandteile zu zerlegen. Wir werden zunächst beschreiben, von welcher Art die Bewegung der Luft ist, im Falle mehrere Klänge in ihr gleichzeitig bestehen, und worin sich eine solche zusammengesetzte Bewegung von der eines einfachen Klanges

unterscheidet. Dabei wird sich ergeben, daß durchaus nicht in allen Fällen für das Ohr ein sicher entscheidender Unterschied zwischen der Luftbewegung besteht, welche durch mehrere, aus verschiedenen Quellen herrührende Klänge erregt wird, und zwischen der eines einzigen Klanges eines einzelnen tönenden Körpers, insoweit nämlich diese Luftbewegung auf das Ohr einwirken kann; und daß das Ohr deshalb vermöge derselben Fähigkeit, mittels welcher es zusammengesetzte Klänge analysiert, auch einfache Klänge unter Umständen analysieren muß. Auf diese Weise wird uns dann der Sinn der Zerlegung eines einzelnen Klanges in eine Reihe von Partialtönen klar werden, und wir werden einsehen, daß dieses Phänomen auf einer der wesentlichsten Grundeigenschaften des menschlichen Ohres beruht.

Wir beginnen mit der Untersuchung der Luftbewegung, welche mehreren gleichzeitig erklingenden und nebeneinander bestehenden Tönen entspricht. Um die Art einer solchen Bewegung anschaulich zu machen, werden wieder die Wellen auf der Oberfläche eines ruhigen Wassers einen geeigneten Anhaltspunkt geben können. Wir haben gesehen, daß, wenn ein Teil der Wasseroberfläche durch einen hineingeworfenen Stein erschüttert wird, die Erschütterung sich in Form von Wellenringen über die Fläche zu immer ferneren und ferneren Punkten hin ausbreitet. Werfen wir nun zwei Steine gleichzeitig an zwei verschiedenen Stellen der Wasserfläche hinein, so haben wir zwei Mittelpunkte der Erschütterung; von jedem aus entsteht ein Wellenring, beide Wellenringe vergrößern sich und treffen endlich aufeinander. Nun werden die Stellen der Wasserfläche, wo sie sich treffen, durch beide Erschütterungen gleichzeitig in Bewegung gesetzt, das hindert aber die beiden Wellenzüge nicht, sich gerade ebenso weiter fortzupflanzen, als wenn jeder von ihnen ganz allein auf der Wasserfläche vorhanden wäre, und der andere gar nicht existierte. Indem sie ihren Weg fortsetzen, trennen sich diejenigen Teile beider Ringe wieder, welche eben zusammengefallen waren, und zeigen sich dem Auge von neuem einzeln und in unveränderter Gestalt. Zu diesen kleinen Wellenringen, welche hineingeworfene Steine hervorbringen, können noch andere Arten von Wellen kommen, wie sie der Wind oder ein vorüberfahrendes Dampfschiff erregt. Man wird auf der schaukelnden Wasserfläche unsere Kreisringe sich ebenso ruhig und regelmäßig aus-

breiten sehen, wie auf einer ebenen. Weder werden die größeren Wellen von den kleineren, noch die kleineren von den größeren wesentlich gestört, vorausgesetzt, daß die Wellen nirgends brandend zerschellen, wodurch dann allerdings ihr regelmäßiger Verlauf gehindert werden würde.

Überhaupt wird man nicht leicht eine größere Wasserfläche von einem hohen Punkte aus überschauen können, ohne daß man eine große Menge verschiedener Wellensysteme, die sich gegenseitig überlagern und durchkreuzen, vor sich sieht. Am reichsten ist darin die Meeresfläche, von einem hohen Ufer aus betrachtet, wenn sie nach heftigerem Winde wieder anfängt, sich zu beruhigen. Man sieht dann einmal die großen Wogen, welche aus weiter stahlblauer Ferne her in langen gestreckten Linien, die sich hier und da durch ihre weiß aufschäumenden Kämme deutlicher abzeichnen, und in regelmäßigen Abständen einander folgen, gegen das Ufer ziehen. Am Ufer werden sie zurückgeworfen, je nach dessen Einbuchtungen in verschiedener Richtung, so daß die ankommenden Wellen von den zurückgeworfenen schräg durchkreuzt werden. Ein vorüberziehendes Dampfschiff bildet etwa noch seinen gabelähnlichen Wellenschweif, oder ein Vogel, der einen Fisch erschnappt, erregt kleine kreisförmige Ringe. Dem Auge des Beschauers gelingt es leicht, allen diesen verschiedenen Wellenzügen, großen und kleinen, breiten und schmalen, geraden und gekrümmten, einzeln zu folgen, ihren Ablauf über die Wasserfläche hin zu beobachten, den jeder ganz ungestört verfolgt, als wäre die Wasserfläche, über die er hinzieht, gar nicht gleichzeitig von anderen Bewegungen und anderen Kräften in Anspruch genommen. Ich muß gestehen, daß mir dieses Schauspiel, so oft ich es aufmerksam verfolgt habe, eine eigentümliche Art intellektuellen Vergnügens gemacht hat, weil hier vor dem körperlichen Auge erschlossen ist, was für die Wellen des unsichtbaren Luftmeeres nur das geistige Auge des Verstandes durch eine lange Reihe komplizierter Schlüsse sich deutlich machen kann.

Ein ganz ähnliches Schauspiel muß man sich nun im Inneren, etwa eines Tanzsaales, vorgehend denken. Da haben wir eine Anzahl von Musikinstrumenten, sprechende Menschen, rauschende Kleider, gleitende Füße, klirrende Gläser usw. Alle diese erregen Wellenzüge, welche durch den Luftraum des Saales hinschießen, an seinen Wänden zurückgeworfen werden, umkehren, dann gegen eine andere Wand treffen, nochmals reflektiert werden, und so fort, bis sie erlöschen.

Man muß sich denken, daß vom Munde der Männer und von den tieferen Musikinstrumenten langgestreckte Wellen ausgehen, 8 bis 12 Fuß lang, von den Lippen der Frauen kürzere, 2 bis 4 Fuß lang, daß das Rauschen der Kleider ein feines kleines Wellengekräusel hervorbringt, kurz ein Durcheinander der verschiedenartigsten Bewegungen, welches man sich kaum verwickelt genug vorstellen kann.

Und doch ist das Ohr imstande, alle die einzelnen Bestandteile eines so verwirrten Ganzen voneinander zu sondern, woraus wir denn schließen müssen, daß in der Luftmasse alle diese verschiedenen Wellenzüge nebeneinander bestehen und sich gegenseitig nicht stören. Wie ist es nun möglich, daß sie nebeneinander bestehen, da jeder einzelne Wellenzug an jeder Stelle des Luftraumes seinen besonderen Wert der Verdichtung oder Verdünnung, der Geschwindigkeit der Luftteilchen nach dieser oder jener Richtung hervorzubringen strebt. Es ist klar, daß an jeder einzelnen Stelle des Luftraumes in jedem Zeitmoment nur ein einziger Grad der Dichtigkeit bestehen kann, daß die Luftteilchen nur eine bestimmte Bewegung von einem bestimmten Grade der Geschwindigkeit und in einer bestimmten Richtung in einem einzelnen Augenblick ausführen können.

Was in einem solchen Falle geschieht, wird bei den Wellen des Wassers dem Auge direkt sichtbar. Wenn über die Wasserfläche lange größere Wellen hinziehen, und wir werfen einen Stein hinein, so werden dessen Wellenringe in die bewegte und zum Teil gehobene, zum Teil gesenkte Fläche gerade ebenso hineingeschnitten, die Berge der Ringe ragen über sie ebensohoch hervor, die Täler sind um ebensoviel tiefer als jene Fläche, wie wenn die Wellenringe sich auf der natürlichen ebenen Oberfläche des Wassers ausbreiteten. Wo also ein Berg des Wellenringes auf einem Berge des größeren Wellenzuges liegt, ist die Erhebung der Wasserfläche gleich der Summe beider Berghöhen, und wo ein Tal des Wellenringes in ein Tal der größeren Wellen fällt, ist die gesamte Einsenkung der Wasserfläche gleich der Summe der Tiefe beider Täler. Wo aber auf der Höhe der größeren Wellenberge sich ein Tal des Wellenringes einschneidet, wird die Höhe dieses Berges vermindert um die Tiefe des Tales. Kürzer können wir diese Beschreibung liefern, wenn wir die Höhen der Berge über dem Niveau der ruhenden Wasserfläche als positive Größen betrachten, die Tiefen der Täler dagegen als negative Größen

und die Summe solcher positiven und negativen Größen im algebraischen Sinne bilden, wobei bekanntlich je zwei positive Größen (Berge), welche zusammenkommen, wirklich addiert werden, je zwei negative (Täler) ebenso; wo aber negative und positive zusammenkommen, diese voneinander subtrahiert werden. Wenn wir also die Addition im algebraischen Sinne ausführen, können wir unsere Beschreibung der Wasserfläche bei zwei zusammentreffenden Wellensystemen einfach so ausdrücken: „Die Erhebung der Wasserfläche in jedem ihrer Punkte ist in jedem Zeitmomente so groß, wie die Summe derjenigen Erhebungen, welche die einzelnen Wellensysteme einzeln genommen an demselben Punkte und zu derselben Zeit hervorgebracht haben würden."

Am deutlichsten und leichtesten unterscheidet das Auge den Vorgang in einem solchen Falle, wie ihn das eben angeführte Beispiel eines Wellenringes auf einer von größeren geradlinigen Wellen durchzogenen Fläche voraussetzte, weil sich hier die beiden Wellensysteme durch die Länge und Höhe ihrer Wellen und durch deren Richtung beträchtlich voneinander unterscheiden. Aber bei einiger Aufmerksamkeit erkennt das Auge, daß genau dasselbe vorgeht, auch wenn die verschiedenen Wellenzüge durch ihre Form weniger voneinander unterschieden sind, wenn z. B. lange geradlinige Wellen, die gegen das Ufer laufen, mit den vom Ufer in etwas anderer Richtung reflektierten sich mischen. Dann entstehen die oft gesehenen kammförmig eingeschnittenen Wellenberge, indem der Rücken der Wellenberge des einen Systems an einzelnen Punkten erhöht wird durch die Berge des anderen Systems, an anderen eingeschnitten durch die Täler des letzteren. Die Mannigfaltigkeit der Formen ist hier außerordentlich groß, es würde viel zu weit führen, sie alle beschreiben zu wollen. An jeder bewegten Wasserfläche ergibt sich das Resultat dem aufmerksamen Beobachter leicht ohne Beschreibung. Für unseren Zweck genügt es hier, wenn der Leser an dem ersten Beispiel sich klar gemacht hat, was es heißt, daß Wellen sich zueinander addieren sollen [1]).

[1]) Auch die Geschwindigkeiten und die Verschiebungen der Wasserteilchen addieren sich nach dem Gesetz des sogenannten Parallelogramms der Kräfte. Übrigens findet eine solche einfache Addition der Wellen streng genommen nur dann statt, wenn die Höhen der Wellen, verglichen mit der Wellenlänge, verhältnismäßig klein sind.

Wenn also auch die Wasseroberfläche in jedem einzelnen Zeitmomente nur eine einzige Form annehmen kann, während zwei verschiedene Wellensysteme gleichzeitig jedes seine besondere Form der Wasserfläche einzuprägen suchen, so können wir doch in dem angeführten Sinne zwei verschiedene Wellensysteme als gleichzeitig bestehend und einander superponiert betrachten, indem wir die wirklich bestehenden Erhebungen und Vertiefungen der Fläche passend in je zwei Teile zerlegt denken, die den einzelnen Systemen angehören.

In demselben Sinne findet nun auch eine Superposition verschiedener Schallwellensysteme in der Luft statt. Durch jeden Schallwellenzug wird die Dichtigkeit der Luft, die Geschwindigkeit und Lage der Luftteilchen zeitweilig verändert. Es gibt Stellen der Schallwelle, die wir den Wellenbergen des Wassers verglichen haben, in denen die Luftmenge vermehrt ist, und die Luft, die nicht wie das Wasser einen freien Raum über sich hat, in den sie ausweichen kann, sich verdichtet; andere Stellen des Luftraumes, den Wellentälern vergleichbar, haben verminderte Luftmenge und daher geringere Dichtigkeit. Wenn also auch nicht an demselben Orte und zu derselben Zeit zwei verschiedene Grade der Dichtigkeit, durch zwei verschiedene Wellensysteme hervorgerufen, nebeneinander bestehen können, so können sich doch die Verdichtungen und Verdünnungen der Luft zueinander addieren, gerade wie Erhöhungen und Vertiefungen der Wasseroberfläche. Wo zwei Verdichtungen zusammentreffen, erhalten wir eine stärkere Verdichtung, wo zwei Verdünnungen, eine stärkere Verdünnung, während Verdichtung und Verdünnung zusammentreffend sich gegenseitig teilweise oder ganz aufheben und neutralisieren.

Die Verschiebungen der Luftteilchen setzen sich ebenso zusammen. Wenn die Verschiebung durch zwei verschiedene Wellensysteme nicht in derselben Richtung erfolgt, so setzen sich beide Verschiebungen nach der Diagonale zusammen; wenn z. B. der eine Wellenzug dasselbe Luftteilchen nach oben, der zweite nach rechts zu verschieben strebt, so wird es schräg nach rechts und oben gehen. Für unseren vorliegenden Zweck brauchen wir auf eine solche Zusammensetzung von Bewegungen verschiedener Richtung nicht näher einzugehen. Es interessiert uns nur die Wirkung der Luftmasse auf das Ohr, und dabei kommt es nur auf die Bewegung der Luft im Gehörgang an. Nun ist aber unser Gehörgang, mit den Schall-

wellenlängen verglichen, verhältnismäßig so eng, daß wir nur Bewegungen der Luft, die seiner Achse parallel gehen, zu berücksichtigen brauchen und also nur Verschiebungen der Luftteilchen nach außen und nach innen, d. h. nach der Mündung und nach der Tiefe des Gehörganges, zu unterscheiden haben. Für die Größe dieser Verschiebungen sowohl, als für die Geschwindigkeiten, mit denen sich die Luftteilchen nach außen oder innen bewegen, findet wieder dieselbe Art von Addition statt, wie für die Wellenberge und Wellentäler.

Wenn also mehrere tönende Körper in dem uns umgebenden Luftraume gleichzeitig Schallwellensysteme erregen, so sind sowohl die Veränderungen der Dichtigkeit der Luft, als die Verschiebungen und die Geschwindigkeiten der Luftteilchen im Inneren des Gehörganges gleich der Summe derjenigen entsprechenden Veränderungen, Verschiebungen und Geschwindigkeiten, welche die einzelnen Schallwellenzüge einzeln genommen hervorgebracht haben würden[1]); und insofern können wir sagen, daß alle die einzelnen Schwingungen, welche die einzelnen Schallwellenzüge hervorgebracht haben würden, ungestört nebeneinander und gleichzeitig in unserem Gehörgang bestehen.

Nachdem wir in dieser Weise zur Erledigung der ersten Frage auseinander gesetzt haben, in welchem Sinne es möglich sei, daß mehrere verschiedene Wellenzüge auf derselben Wasserfläche oder in demselben Luftraume nebeneinander bestehen, gehen wir dazu über, die Art der Tätigkeit zu bestimmen, welche unseren Sinnesorganen zufällt, die ein so zusammengesetztes Ganzes wieder in seine Bestandteile auflösen sollen.

Ich habe schon angeführt, daß das Auge, welches eine weite vielbewegte Wasserfläche überblickt, mit ziemlicher Leichtigkeit die einzelnen Wellenzüge voneinander trennen und einzeln verfolgen kann. Das Auge hat hierbei dem Ohr gegenüber einen großen Vorteil dadurch, daß es eine große Ausdehnung der Wasserfläche gleichzeitig überblicken kann. Es unterscheidet also leicht, ob die einzelnen Wellenzüge geradlinig oder gekrümmt sind, ob sie denselben Mittelpunkt ihrer Krümmung haben oder nicht, in welcher

[1]) Dasselbe gilt für den ganzen Luftraum, wenn man die Addition der Verschiebungen von verschiedener Richtung nach dem Gesetze des Parallelogramms der Kräfte vollzieht.

Richtung sie sich fortpflanzen, und in allen diesen Beobachtungen erhält es ebensoviel Hilfsmittel, um zu unterscheiden, ob zwei Wellenberge zusammengehören oder nicht, bzw. um die zusammengehörigen Teile der einzelnen herauszufinden. Dazu kommt dann auch noch, daß auf der Wasserfläche Wellen von ungleicher Wellenlänge mit ungleicher Geschwindigkeit fortschreiten. Wenn dieselben also auch in irgend einem Zeitmomente so zusammenfallen, daß sie schwer zu trennen sind, so eilt doch unmittelbar darauf der eine Zug voran, der andere bleibt nach, und sie werden dann bald dem Auge wieder vereinzelt sichtbar. Auf diese Weise ist es im ganzen dem Beobachter sehr erleichtert, jedes einzelne System auf seinen besonderen Ursprungsort zu beziehen und es während seines weiteren Verlaufes im Auge zu behalten. Für den Gesichtssinn können also namentlich auch zwei Wellensysteme niemals verschmelzen, welche zwei verschiedene Ursprungsorte haben, zwei Wellenringe z. B., die von zwei an verschiedenen Punkten in das Wasser geworfenen Steinen herrühren. Wenn auch an einer Stelle die Wellenringe etwa so zusammenfallen sollten, daß sie nicht leicht zu trennen sind, so werden sie im größten Teile ihres Umfanges immer getrennt bleiben. Das Auge wird also nicht leicht in die Lage kommen können, eine zusammengesetzte Wellenbewegung mit einer einfachen zu verwechseln. Das ist es aber gerade, was unter ganz ähnlichen Umständen das Ohr tut, wenn es den Klang, welcher von einer einzigen Tonquelle hervorgebracht ist, in eine Reihe von Partialtönen auflöst.

Das Ohr befindet sich aber einem Schallwellensystem gegenüber auch in einer viel ungünstigeren Lage, als das Auge einem Wasserwellensystem gegenüber. Das Ohr wird ja nämlich nur von der Bewegung derjenigen Luftmasse affiziert, die sich in der unmittelbarsten Nähe seines Trommelfelles im Gehörgang befindet. Da der Querschnitt des Gehörganges verhältnismäßig klein ist, verglichen mit der Länge der Schallwellen, die für die musikalisch brauchbaren Töne zwischen 32 Fuß und 6 Zoll beträgt, so entspricht der Querschnitt des Gehörganges nur einem einzigen Punkt der bewegten Luftmasse. Er ist zu klein, als daß an verschiedenen Punkten desselben merklich verschiedene Grade der Verdichtung oder Geschwindigkeit vorkommen könnten, denn die Orte größter und kleinster Verdichtung, größter positiver und negativer Geschwindigkeit sind

immer um eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt. Das Ohr befindet sich also etwa in derselben Lage, wie wenn wir das Auge durch eine enge Röhre nach einem einzigen Punkt der Wasserfläche blicken ließen, dessen Steigen und Fallen es erkennen könnte, und ihm zumuteten, auch unter diesen Umständen die Analyse der zusammengesetzten Wellen vorzunehmen, an welcher Aufgabe, wie leicht einzusehen ist, das Auge in den meisten Fällen vollständig scheitern würde. Das Ohr ist nicht imstande, zu erkennen, welcher Art die Luftbewegung in entfernten Stellen des Raumes ist, ob die Wellen, von denen es selbst getroffen wird, ebene oder kugelige Flächen sind, ob sie sich in einem oder mehreren Kreisen zusammenschließen, in welcher Richtung sie fortschreiten. Ihm gehen alle die Hilfsmittel ab, auf die sich das Urteil des Auges hauptsächlich stützt.

Wenn demnach das Ohr trotz aller dieser Schwierigkeiten doch die Fähigkeit hat, die Klänge verschiedenen Ursprungs voneinander zu trennen — und in der Tat zeigt es eine bewunderungswürdige Fertigkeit in der Lösung dieser Aufgabe —, so muß es diese Trennung mittels ganz anderer Hilfsmittel und Fähigkeiten zustande bringen, als die sind, welche das Auge benutzt. Welches aber auch diese Hilfsmittel seien — wir werden ihre Natur später zu bestimmen suchen —, so ist klar, daß die Analyse einer zusammengesetzten Klangmasse anknüpfen muß an bestimmte Eigentümlichkeiten der Luftbewegung, welche auch in einer so kleinen Luftmasse sich ausprägen können, wie die im Gehörgang enthaltene ist. Wenn die Bewegungen der Luftteilchen im Gehörgang bei zwei verschiedenen Gelegenheiten gleich sind, wird auch die gleiche Empfindung im Ohr entstehen müssen, welches auch der Ursprung der genannten Bewegungen sein mag, ob sie von einer oder von mehreren Tonquellen herrühren.

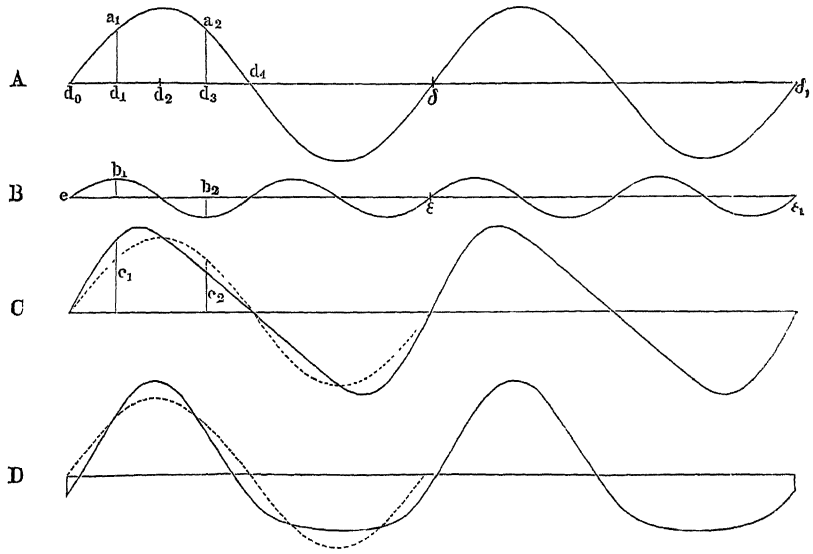
Wir haben schon vorher auseinander gesetzt, daß die Luftmasse, die das Trommelfell berührt, bei den hier in Betracht kommenden Verhältnissen nur wie ein einzelner Punkt in dem uns umgebenden Luftraum betrachtet werden kann. Gibt es also Eigentümlichkeiten der Bewegung eines einzelnen Luftteilchens, welche verschieden sind bei einem einfachen Klang und einer aus mehreren Klängen zusammengesetzten Klangmasse? Wir haben gesehen, daß jedem einzelnen Klang eine periodische Bewegung der Luft entspricht, und daß seine Tonhöhe durch die Länge der Periode bestimmt wird,

daß aber die Art der Bewegung innerhalb einer einzelnen Periode ganz willkürlich ist, und eine unendliche Mannigfaltigkeit verschiedener Formen zuläßt. Wenn nun die Luftbewegung innerhalb des Gehörganges nicht periodisch ist, oder ihre Perioden wenigstens nicht so kurz sind, wie die eines hörbaren Klanges, so ist sie durch diesen Umstand schon von jeder Bewegung unterschieden, die einem einzelnen Klang angehört; sie muß dann Geräuschen oder einer Anzahl gleichzeitig bestehender Klänge entsprechen. Von dieser Art sind wirklich die meisten Fälle, wo nur der Zufall verschiedene Klänge zusammengebracht hat, wo die Klänge nicht absichtlich zu konsonanten Akkorden musikalisch verbunden sind, und selbst wo musiziert wird, sind bei der jetzt herrschenden temperierten Stimmung der Instrumente selten die Bedingungen genau eingehalten, welche erfüllt sein müssen, damit die resultierende Bewegung der Luft genau periodisch ist. In der Mehrzahl der Fälle wird also die mangelnde Periodizität der Bewegung das Kennzeichen einer zusammengesetzten Klangmasse abgeben können.

Aber es kann eine zusammengesetzte Klangmasse auch eine rein periodische Luftbewegung geben, dann nämlich, wenn alle Klänge, welche sich mischen, Schwingungszahlen haben, welche ganze Vielfache von einer und derselben Schwingungszahl sind, oder was dasselbe sagt, wenn alle diese Klänge ihrer Tonhöhe nach als harmonische Obertöne desselben Grundtones angesehen werden können. Es ist schon im ersten Abschnitt gesagt worden, daß die Schwingungszahlen der Obertöne ganze Vielfache von der Schwingungszahl des Grundtones sind. An einem bestimmten Beispiel wird der Sinn dieser Regel klar werden. Die Kurve *A*, Fig. 11, stellt in der Weise, wie wir es im ersten Abschnitt auseinander gesetzt haben, eine einfache pendelartige Bewegung dar, wie sie durch eine tönende Stimmgabel in der Luft des Gehörganges hervorgerufen wird. Die horizontalen Längen in den Kurven der Fig. 11 stellen also die fortschreitende Zeit dar, die vertikalen Höhen der Kurve die entsprechenden Verschiebungen der Luftteilchen im Gehörgang. Es soll nun zu dem ersten Ton, dem die Kurve *A* angehört, noch ein zweiter hinzukommen, der die höhere Oktave des vorigen ist, und dem die durch Kurve *B* dargestellte Luftbewegung angehört. Dementsprechend haben zwei Schwingungen der Kurve *B* genau dieselbe Länge, wie eine Schwingung von *A*.

In A enthalten die Abschnitte $d_0\,\delta$ und $\delta\,\delta_1$ vollkommen kongruente Stücke der Kurve. Die Kurve B ist ebenfalls in kongruente Stücke geteilt durch die Punkte $e\,\varepsilon$ und $\varepsilon\,\varepsilon_1$. Zwar könnten wir noch jeden der Abschnitte $e\,\varepsilon$ und $\varepsilon\,\varepsilon_1$ halbieren und würden dann wiederum unter sich kongruente Stücke bekommen, welche je einer einzelnen Periode von B entsprechen. Aber indem wir je zwei Perioden von B zusammenfassen, erhalten wir eine Teilung von B in Abschnitte, die genau ebensolang sind, wie die Abschnitte von A.

Fig. 11.



Wenn nun beide Töne zusammen erklingen, und der Zeit nach der Punkt e mit d_0, ε mit δ, ε_1 mit δ_1 zusammenfällt, so addieren sich die Höhen des Kurvenstückes $e\,\varepsilon$ zu den Höhen von $d_0\,\delta$, ebenso die von $\varepsilon\,\varepsilon_1$ zu denen von $\delta\,\delta_1$. Das Resultat dieser Addition ist dargestellt durch die Kurve C. Die punktierte Linie ist eine Kopie von dem Abschnitt $d_0\,\delta$ der Kurve A. Sie dient dazu, dem Auge die Zusammensetzung unmittelbar anschaulich zu machen. Man sieht leicht, daß die Kurve C sich überall ebenso hoch über die Höhe von A hebt oder darunter senkt, als die Kurve B sich über die Horizontale erhebt, bzw. unter sie senkt. Die Höhen der Kurve C sind also, der Regel über Zusammensetzung der Schwingungen entsprechend, gleich der (algebraischen) Summe der ent-

sprechenden Höhen von A und B. So ist das Lot c_1 in C die Summe der Lote a_1 und b_1 in A und B; der untere Teil dieses Lotes c_1 bis zur punktierten Kurve hinauf ist gleich dem Lote a_1, der obere gleich dem Lote b_1. Dagegen ist das Lot c_2 gleich der Höhe a_2, vermindert um die Tiefe der Senkung b_2, und in derselben Weise sind alle anderen Höhen der Kurve C gefunden.

Daß die in der Kurve C dargestellte Bewegung ebenfalls periodisch ist und dieselbe Länge der Perioden hat wie A, ist ersichtlich. In der Tat muß die Addition der Abschnitte $d_0\delta$ von A und $e\varepsilon$ von B dasselbe Resultat geben, wie die Addition der den vorigen ganz gleichen Abschnitte $\delta\delta_1$ und $\varepsilon\varepsilon_1$ und, wenn man die Kurven fortgesetzt denkt, ebenso aller folgenden gleichen Abschnitte, in die sie zerfallen. Es ist aber auch ersichtlich, daß nur dann immer wieder gleiche Stücke beider Kurven bei der Addition aufeinander fallen werden, wenn die Kurven sich in kongruente Abschnitte teilen lassen, die genau gleiche Länge haben, wie es in Fig. 11 der Fall ist, wo zwei Perioden von B genau gleich lang sind wie eine von A. Die horizontalen Längen unserer Figuren stellen aber die Zeit dar, und indem wir von unseren Kurven auf die wirklichen Bewegungen zurückgehen, ergibt sich demnach, daß die aus den Tönen A und B zusammengesetzte Luftbewegung trotz ihrer Zusammensetzung deshalb periodisch ist, weil der eine Ton genau doppelt soviel Schwingungen in gleicher Zeit macht, als der andere.

Es läßt sich an diesem Beispiel leicht einsehen, daß es gar nicht auf die besondere Form der beiden Kurven A und B ankommt, damit ihre Summe C wieder eine genau periodische Kurve sei. Welche Form A und B auch haben mögen, wenn nur jede in kongruente Abschnitte zerschnitten werden kann, deren Länge den Abschnitten der anderen Kurve gleich ist, sei es, daß diese Abschnitte nun eine oder zwei, drei usw. Perioden der einzelnen Kurve umfassen, so wird doch je ein Abschnitt der Kurve A, mit je einem Abschnitt der Kurve B zusammengesetzt, immer einen Abschnitt von C geben, der den übrigen aus anderen entsprechenden Abschnitten von A und B zusammengesetzten Abschnitten von C gleich sein muß.

Wenn ein solcher Abschnitt mehrere Perioden der betreffenden Kurve umfaßt, wie in Fig. 11 die Abschnitte $e\varepsilon$ und $\varepsilon\varepsilon_1$ je zwei Perioden des Tones B umfassen, so ist B der Tonhöhe nach gleich

einem Oberton desjenigen Grundtones, dessen Periode der Länge eines jener Hauptabschnitte gleich ist (in Fig. 11 des Tones *A*), wie es die oben aufgestellte Regel verlangt.

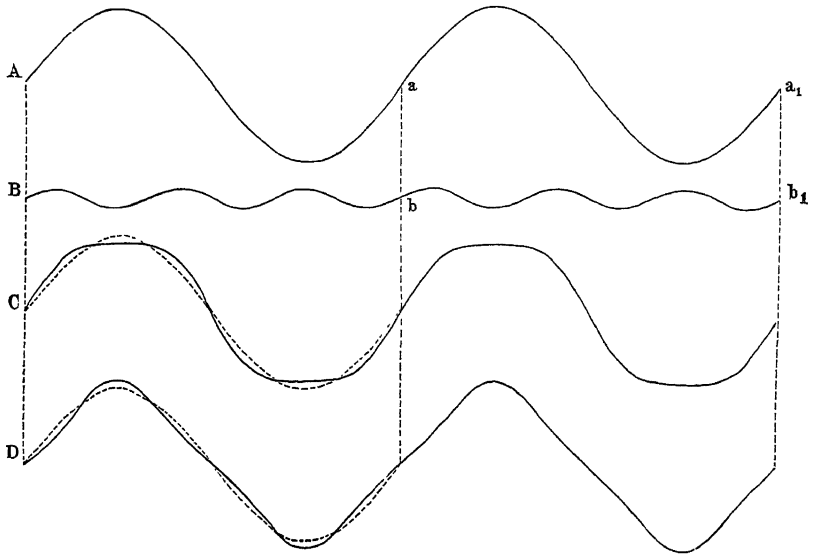
Um die Mannigfaltigkeit der Formen, welche durch verhältnismäßig einfache Zusammensetzungen entstehen können, einigermaßen anschaulich zu machen, bemerke ich, daß die zusammengesetzte Kurve schon dadurch eine andere Form erhält, daß wir die Kurve *B* unter *A* nur etwas verschieben, ehe wir zur Addition schreiten. Es sei *B* so weit verschoben, daß der Punkt *e* unter d_1 fällt, so erhalten wir die Kurve Fig. 11 *D* mit schmalen Bergen und breiten Tälern, die beiden Abhänge der Berge aber gleich steil, während in der Kurve *C* der eine Abhang steiler ist als der andere. Verschieben wir die Kurve *B* weiter, bis *e* unter d_2 fällt, so ist die zusammengesetzte Kurve gleich dem Spiegelbilde von *C*, d. h. sie hat dieselbe Gestalt wie *C*, wenn man rechts mit links verkehrt; der steilere Abhang, welcher in *C* links liegt, würde rechts liegen. Verschieben wir endlich *B* so weit, daß der Punkt *e* unter d_3 fällt, so erhalten wir eine Kurve ähnlich *D*, nur das untere nach oben gekehrt, die also wie *D* aussieht, wenn man das Buch umkehrt, die Bergrücken breit, die Täler schmal.

Alle diese Kurven mit ihren Übergangsstufen sind periodische Kurven. Andere zusammengesetzte periodische Kurven sind in Fig. 12 *C*, *D* dargestellt, zusammengesetzt aus den beiden Kurven *A*, *B*, deren Perioden im Verhältnis von 1 zu 3 stehen. Die punktierten Linien sind wieder Kopien von der ersten Schwingung der Kurve *A*, damit der Leser daran erkenne, wie die betreffende zusammengesetzte Kurve überall so hoch über oder unter *A* steht, als *B* über oder unter der Horizontallinie. In *C* sind *A* und *B* so addiert, wie sie untereinander stehen, in *D* ist *B* zuerst um eine halbe Wellenlänge nach rechts geschoben und dann zu *A* addiert. Beide Formen sind verschieden untereinander und verschieden von allen früheren. *C* hat breite Berge und breite Täler, *D* schmale Berge und schmale Täler.

In diesen und ähnlichen Fällen fanden wir, daß die zusammengesetzte Bewegung vollkommen und regelmäßig periodisch ist, d. h. sie ist vollständig von der Art, wie sie auch einem einzelnen Klang zukommen könnte. Die Kurven, welche wir in unseren Beispielen zusammengesetzt haben, entsprechen der Bewegung einfacher Töne.

Es könnten also z. B. die in Fig. 11 abgebildeten Bewegungen durch zwei Stimmgabeln hervorgebracht werden, von denen eine die höhere Oktave der anderen gibt. Aber wir werden später sehen, daß auch eine schwach angeblasene Flöte allein schon hinreicht, eine Luftbewegung zu erzeugen, die der in Fig. 11 *C* oder *D* dargestellten entspricht. Die Bewegungen von Fig. 12 könnten durch zwei gleichzeitig tönende Stimmgabeln hervorgebracht werden, von denen die eine die Duodezime der anderen gibt. Aber auch eine einzige gedackte Orgelpfeife von

Fig. 12.



der engeren Art (Register Quintaten) würde nahehin die Bewegung geben, welche Fig. 12 *C* oder *D* darstellen.

Hier fehlt also der Luftbewegung im Gehörgang jede Eigentümlichkeit, an welcher der zusammengesetzte Klang von dem einfachen unterschieden werden könnte. Wenn dem Ohr nicht andere zufällige Umstände zu Hilfe kommen, daß z. B. die eine Stimmgabel eher zu tönen beginnt und man den zweiten Ton später hinzukommen hört, daß man das Anschlagen der Gabeln hört, oder im anderen Falle das Sausen der Luft bei der angeblasenen Flöte oder Pfeife, so wird jedes Kennzeichen fehlen, um zu entscheiden, ob der Klang einfach oder zusammengesetzt sei.

Wie verhält sich nun das Ohr einer solchen Luftbewegung gegenüber? Zerlegt es sie, oder zerlegt es sie nicht? Die Erfahrung

lehrt, daß, wenn zwei Stimmgabeln in der Oktave oder Duodezime zusammenklingen, das Ohr sehr wohl imstande ist, ihre Töne voneinander zu scheiden, wenn auch diese Scheidung etwas schwieriger ist, als bei anderen Intervallen. Wenn aber das Ohr imstande ist, einen solchen Zusammenklang zweier Stimmgabeln aufzulösen, so wird es nicht umhin können, dieselbe Analyse auch auszuführen, wenn dieselbe Luftbewegung durch eine einzige Flöte oder Orgelpfeife hervorgebracht wird. Und dies geschieht wirklich; der an sich einfache, aus einer Quelle hervorgehende Klang eines solchen Tonwerkzeuges wird, wir wir schon angeführt haben, in Partialtöne aufgelöst, einen Grundton und je einen Oberton in unseren Beispielen.

Die Auflösung eines einzelnen Klanges in eine Reihe von Partialtönen beruht also auf derselben Fähigkeit des Ohres, vermöge deren es imstande ist, verschiedene Klänge voneinander zu trennen, und es wird in beiden Fällen die Scheidung ausführen müssen nach einer Regel, die gar nicht darauf Rücksicht nimmt, ob die Schallwellen aus einem oder mehreren Tonwerkzeugen hervorgegangen sind.

Die Regel, nach welcher das Ohr die Analyse vornimmt, ist zuerst als allgemein gültig hingestellt worden von G. S. Ohm. Es ist schon im vorigen Abschnitt ein Teil dieser Regel ausgesprochen, indem angeführt wurde, daß nur diejenige Luftbewegung, die wir durch den Namen der einfachen Schwingung hervorgehoben haben, bei welcher die schwingenden Luftteilchen nach dem Gesetz des Pendels hin und her gehen, im Ohr die Empfindung eines einzigen und einfachen Tones hervorbringe. Jede Luftbewegung nun, welche einer zusammengesetzten Klangmasse entspricht, ist nach Ohms Regel zu zerlegen in eine Summe einfacher pendelartiger Schwingungen, und jeder solchen einfachen Schwingung entspricht ein Ton, den das Ohr empfindet, und dessen Tonhöhe durch die Schwingungsdauer der entsprechenden Luftbewegung bestimmt ist.

Die Beweise für die Richtigkeit dieser Regel, die Ursachen, warum unter allen Schwingungsformen die eine, welche wir die einfache genannt haben, eine so hervortretende Rolle spielt, werden wir erst später im vierten und sechsten Abschnitt beibringen können. Hier handelt es sich zunächst nur noch darum, den Sinn der Regel klar zu machen.

Die einfache Schwingungsform ist unveränderlich und immer dieselbe, nur ihre Amplitude und die Dauer ihrer Periode kann sich verändern. Wir haben in den Fig. 11 und 12 aber schon gesehen, wie durch Zusammensetzung von auch nur je zwei einfachen Schwingungen ziemlich mannigfaltige Formen entstehen können. Die Zahl dieser Formen ließe sich nun, selbst ohne neue einfache Schwingungen von anderer Periode hinzuzunehmen, noch weiter dadurch vermehren, daß wir entweder das Verhältnis der Höhen beider einfachen Schwingungskurven *A* und *B* zueinander veränderten, oder daß wir die Kurve *B* um andere Längen unter *A* verschieben, als wir in den Zeichnungen getan haben. Nach diesen einfachsten Beispielen solcher Zusammensetzung wird der Leser sich eine Vorstellung davon bilden können, eine wie ungeheure Verschiedenheit von Formen sich ergeben würde, wenn wir statt zweier einfacher Schwingungen eine größere Zahl derselben zusammensetzen wollten, welche alle Obertönen desselben Grundtones entsprechen und daher durch Addition immer wieder periodische Kurven geben würden. Wir würden die Höhen jeder einzelnen beliebig größer oder kleiner machen können, wir würden jede einzelne um ein beliebiges Stück gegen den Grundton verschieben oder, nach physikalischer Ausdrucksweise, die Amplitude und den Phasenunterschied zwischen ihr und dem Grundton verändern können, und jede solche Änderung der Amplitude oder des Phasenunterschiedes jeder einzelnen von ihnen würde eine neue Abänderung der zusammengesetzten Schwingungsform geben.

Die Mannigfaltigkeit der Schwingungsformen, welche in dieser Weise durch Zusammensetzung einfacher pendelartiger Schwingungen erhalten werden kann, ist nicht nur außerordentlich groß, sondern sie ist so groß, daß sie gar nicht größer sein kann. Es hat nämlich der berühmte französische Mathematiker Fourier ein mathematisches Gesetz erwiesen, welches wir mit Bezug auf den vorliegenden Gegenstand so aussprechen können: Jede beliebige regelmäßig periodische Schwingungsform kann aus einer Summe von einfachen Schwingungen zusammengesetzt werden, deren Schwingungszahlen ein-, zwei-, drei-, vier- usw. mal so groß sind als die Schwingungszahl der gegebenen Bewegung.

Die Amplituden der elementaren einfachen Schwingung, welchen in unseren Wellenkurven die Höhe entspricht, und die Phasen-

unterschiede, d. h. die horizontalen Verschiebungen der Wellenkurven gegeneinander, können in jedem Falle, wie Fourier gezeigt hat, durch besondere Rechnungsmethoden, welche eine populäre Darstellung nicht erlauben, gefunden werden, wobei sich herausstellt, daß eine gegebene regelmäßig periodische Bewegung nur in einer einzigen Weise und in keiner anderen dargestellt werden kann als Summe einer gewissen Anzahl pendelartiger Schwingungen.

Da nun nach unseren Festsetzungen eine regelmäßig periodische Bewegung einem musikalischen Klang entspricht, und eine einfache pendelartige Schwingung einem einfachen Ton, so können wir diese Sätze von Fourier mit Anwendung der akustischen Bezeichnungen auch so aussprechen:

Jede Schwingungsbewegung der Luft im Gehörgang, welche einem musikalischen Klang entspricht, kann immer, und jedesmal nur in einer einzigen Weise, dargestellt werden als die Summe einer Anzahl einfacher schwingender Bewegungen, welche Teiltönen dieses Klanges entsprechen.

Da nach diesen Sätzen eben jede Schwingungsform, sie sei gestaltet, wie sie nur irgend wolle, ausgedrückt werden kann als eine Summe einfacher Schwingungen, so ist ihre Zerlegung in eine solche Summe auch ganz unabhängig davon, ob man mit dem Auge schon der sie darstellenden Kurve ansehen kann, daß und welche einfache Schwingungen etwa in ihr enthalten sein mögen oder nicht. Ich muß dies hervorheben, weil ich ziemlich häufig selbst Naturforscher von der falschen Voraussetzung habe ausgehen sehen, daß die Schwingungsfigur kleine Wellen, entsprechend den einzelnen hörbaren Obertönen, zeigen müßte. Schon an den Beispielen der Fig. 11 und 12 wird man sich überzeugen, daß das Auge die Zusammensetzung allenfalls an dem Teil der Kurve übersehen kann, wo wir die Kurve des Grundtones punktiert hinzugesetzt haben, aber schon nicht mehr an den isoliert gezeichneten Teilen der Kurven *C* und *D* beider Figuren. Oder wenn ein Beobachter, der sich die Form der einfachen Schwingungen recht genau eingeprägt hat, dies auch allenfalls noch leisten zu können glauben möchte, so würde er doch gewiß scheitern, wenn er mit dem Auge allein zu ermitteln versuchen wollte, wie etwa die in Fig. 8 und 9 des ersten Abschnittes gezeichneten Kurven zusammenzusetzen wären. In diesen kommen

gerade Linien und scharfe Ecken vor. Man wird vielleicht fragen, wie ist es möglich, durch eine Zusammensetzung so weich und gleichmäßig gekrümmter Kurven, wie unsere einfachen Wellenkurven *A* und *B*, Fig. 11 und 12, sind, teils gerade Linien, teils scharfe Ecken zu erzeugen. Darauf ist zu erwidern, daß man eine unendlich große Anzahl von einfachen Schwingungen braucht, um Kurven zu erzeugen mit solchen Diskontinuitäten, wie sie dort hervortreten. Wenn aber sehr viele solche Kurven zusammenkommen, und so gewählt werden, daß an gewissen Stellen die Krümmungen aller in gleichem Sinne gewendet sind, an anderen Stellen entgegengesetzt, so verstärken sich die Krümmungen am ersteren Ort gegenseitig, und wir erhalten schließlich eine unendlich starke Krümmung, d. h. eine scharfe Ecke, an den übrigen Stellen heben sich die Krümmungen gegenseitig auf, so daß zuletzt eine gerade Linie daraus hervorgeht. Im allgemeinen kann man dementsprechend als Regel festhalten, daß die Stärke der hohen Obertöne desto größer ist, je schärfere Diskontinuitäten die Luftbewegung zeigt. Wo die Bewegung sich gleichmäßig und allmählich verändert, entsprechend einer in weichen Bogenformen verlaufenden Schwingungskurve, haben nur die tieferen, dem Grundton näher liegenden Teiltöne eine merkliche Intensität. Wo aber die Bewegung stoßweise verändert wird, in der Schwingungskurve also Ecken oder plötzliche Änderungen der Krümmung vorkommen, da sind auch noch hohe Obertöne von merklicher Stärke, obgleich in allen diesen Fällen die Amplituden abnehmen, je höher die Obertöne sind[1]).

Beispiele von der Auflösung gegebener Schwingungsformen in die einzelnen Teiltöne werden wir noch im fünften Abschnitt kennen lernen.

Das hier erwähnte Theorem von Fourier ergibt zunächst nur, daß es mathematisch möglich ist, einen Klang als eine Summe von

[1]) Wenn n die Ordnungszahl eines Partialtones ist, so nimmt bei sehr hohen wachsenden Werten von n die Amplitude der Obertöne ab: 1. wenn die Amplitude der Schwingung selbst einen plötzlichen Sprung macht, wie $\frac{1}{n}$; 2. wenn ihr Differentialquotient einen Sprung macht, die Kurve also eine scharfe Ecke hat, wie $\frac{1}{n \cdot n}$; 3. wenn die Krümmung sich plötzlich verändert, wie $\frac{1}{n \cdot n \cdot n}$; 4. wenn keiner der Differentialquotienten diskontinuierlich ist, muß sie schneller oder ebenso schnell abnehmen, wie e^{-n}.

Tönen zu betrachten, die Worte in dem von uns festgesetzten Sinne genommen, und die Mathematiker haben es auch immer bequem gefunden, diese Art der Zerlegung der Schwingungen ihren akustischen Untersuchungen zugrunde zu legen. Aber daraus folgt noch keineswegs, daß wir gezwungen seien, die Sache so zu betrachten. Wir müssen vielmehr fragen, bestehen denn diese Teiltöne eines Klanges, welche die mathematische Theorie ausscheidet, und welche das Ohr empfindet, auch wirklich in der Luftmasse außerhalb des Ohres? Ist diese Art, die Schwingungsformen aufzulösen, wie sie das Theorem von Fourier vorschreibt und möglich macht, nicht bloß eine mathematische Fiktion, welche zur Erleichterung der Rechnung erlaubt sein mag, aber nicht notwendig irgend einen entsprechenden reellen Sinn zu haben braucht? Warum verfallen wir gerade darauf, pendelartige Schwingungen als das einfachste Element aller Schallbewegungen zu betrachten? Wir können ein Ganzes in sehr verschiedener und beliebiger Weise in Teile zerlegt denken; wir können innerhalb einer Rechnung es vielleicht bequem finden, statt der Zahl 12 die Summe $8 + 4$ zu setzen, weil sich die 8 weghebt, aber daraus folgt nicht, daß nun die Zahl 12 notwendig immer als die Summe von 8 und 4 betrachtet werden müsse. In einem anderen Falle könnte es vorteilhafter sein, die 12 als Summe von 7 und 5 anzusehen. Ebensowenig berechtigt uns die durch Fourier nachgewiesene mathematische Möglichkeit, alle Schallbewegung aus einfachen Schwingungen zusammen zu setzen, daraus zu folgern, daß dies die einzig erlaubte Art der Analyse sei, wenn wir nicht nachweisen können, daß dieselbe auch einen wesentlichen reellen Sinn habe. Der Umstand, daß das Ohr dieselbe Zerlegung ausführt, spricht nun allerdings schon sehr dafür, daß die genannte Zerlegung einen Sinn hat, der sich auch in der Außenwelt, unabhängig von aller Theorie, werde bewähren müssen, ebensogut wie auch schon der andere genannte Umstand, daß diese Art der Zerlegung bei den mathematischen Untersuchungen sich als soviel vorteilhafter erwiesen hat, als jede andere, dieselbe Vermutung unterstützen mag. Denn natürlich sind diejenigen Betrachtungsweisen, welche der innersten Natur der Sache entsprechen, auch immer diejenigen, welche die zweckmäßigste und klarste theoretische Behandlungsweise geben. Mit den Leistungen des Ohres aber diese Untersuchung zu beginnen, möchte nicht rätlich sein, weil diese außer-

ordentlich verwickelt sind und selbst der Erklärung bedürfen. Wir wollen daher zuerst im nächsten Abschnitt untersuchen, ob die Zerlegung in einfache Schwingungen auch in der Außenwelt unabhängig vom Ohr eine tatsächliche Bedeutung habe, und wir werden in der Tat imstande sein, nachzuweisen, daß bestimmte mechanische Wirkungen davon abhängen, ob in einer Klangmasse ein gewisser Teilton enthalten sei oder nicht. Dadurch erst erhält die Existenz der Teiltöne ihre reelle Bedeutung, und die Kenntnis ihrer mechanischen Wirkungsfähigkeit wird dann ein neues Licht auf ihre Beziehungen zum menschlichen Ohr werfen.

Dritter Abschnitt.

Analyse der Klänge durch Mittönen.

Wir gehen jetzt darauf aus, nachzuweisen, daß den in einer Klangmasse enthaltenen einfachen Partialtönen besondere mechanische Wirkungen in der Außenwelt zukommen, welche unabhängig sind vom menschlichen Ohr und seinen Empfindungen, unabhängig ferner von bloß theoretischen Betrachtungsweisen, und welche daher dieser besonderen Zerlegungsweise der Schwingungsformen in pendelartige Schwingungen eine besondere objektiv gültige Bedeutung zuweisen.

Eine solche Wirkung findet in dem Phänomen des Mittönens statt. Dieses Phänomen kommt bei allen solchen Körpern vor, welche, wenn sie einmal durch irgend einen Anstoß in Schwingung versetzt worden sind, eine längere Reihe von Schwingungen ausführen, ehe sie wieder zur Ruhe kommen. Wenn dergleichen Körper nämlich von regelmäßig periodischen Stößen getroffen werden, von denen jeder einzelne viel zu schwach und unbedeutend sein mag, um eine merkliche Bewegung des schwingungsfähigen Körpers hervorzubringen, so können dennoch sehr starke und ausgiebige Schwingungen des genannten Körpers entstehen, wenn die Periode seiner eigenen Schwingungen genau gleich ist der Periode jener schwachen Anstöße. Wenn aber die Periode der regelmäßig sich wiederholenden Stöße abweicht von der Periode der eigenen Schwingungen, so entsteht eine schwache oder ganz unmerkliche Bewegung.

Dergleichen periodische Anstöße gehen nun gewöhnlich aus von einem anderen in regelmäßigen Schwingungen begriffenen Körper; dann rufen also die Schwingungen des letzteren nach einiger Zeit auch die Schwingungen des erstgenannten hervor. Unter diesen Umständen nennen wir den Vorgang Mitschwingen oder Mittönen. Die Schwingungen können so schnell sein, daß sie tönen, sie können

aber auch so langsam sein, daß sie keine Empfindung im Ohr hervorzurufen vermögen; das ändert nichts im Wesen der Sache. Das Mittönen ist ein den Musikern wohlbekanntes Phänomen. Wenn z. B. die Saiten zweier Violinen genau gleich gestimmt sind, und man die eine anstreicht, gerät auch die gleichnamige Saite der anderen Violine in Schwingung. Das Wesen des Vorganges läßt sich aber besser an solchen Beispielen darlegen, bei denen die Schwingungen langsam genug sind, daß man alle ihre Phasen einzeln beobachten kann.

So ist es z. B. bekannt, daß die größten Kirchenglocken durch taktmäßiges Ziehen an dem Glockenseil von einem Manne oder selbst einem Knaben in Bewegung gesetzt werden können, Glocken von so großem Metallgewicht, daß der stärkste Mann, welcher sie aus ihrer Lage zu bringen sucht, sie kaum merklich bewegt, wenn er seine Kraft nicht in bestimmten taktmäßigen Absätzen anwendet. Ist eine solche Glocke einmal in Bewegung gesetzt, so setzt sie, wie ein angestoßenes Pendel, ihre Schwingungen noch lange fort, ehe sie allmählich zur Ruhe kommt, auch wenn sie ganz sich selbst überlassen bleibt, und keine Kraft zur Unterstützung ihrer Bewegungen da ist. Allmählich freilich nimmt ihre Bewegung ab, indem Reibung in den Achsen und Luftwiderstand bei jeder einzelnen Schwingung einen Teil der vorhandenen Bewegungskraft der Glocke vernichten.

Während die Glocke hin und her schwankt, hebt und senkt sich der Hebel mit dem Glockenseil, der oben an ihrer Achse befestigt ist. Wenn nun, während der Hebel sich senkt, ein Knabe sich an das untere Ende des Glockenseiles anhängt, so wirkt die Schwere seines Körpers so auf die Glocke, daß sie deren eben vorhandene Bewegung beschleunigt. Diese Beschleunigung mag sehr klein sein, und doch wird sie eine entsprechende Vermehrung der Schwingungsweite der Glocke bewirken, die sich auch wiederum eine Weile erhält, bis sie durch Reibung und Luftwiderstand vernichtet ist. Wollte der Knabe sich aber zu unrechter Zeit an das Glockenseil anhängen, während dieses aufsteigt, so würde die Schwere seines Körpers der Bewegung der Glocke entgegenwirken und die Schwingungsweite verkleinern. Wenn sich nun der Knabe bei jeder Schwingung so lange an das Seil hängt, als dieses sich senkt, und es so lange frei läßt, als es sich hebt, so wird er bei jeder Schwingung die Bewegung der Glocke nur beschleunigen und ihre Schwingungen so allmählich

größer und größer machen, bis durch die Vergrößerung der Schwingungen auch die bei jeder Schwingung von der Glocke an die Turmwände und die Luft abgegebene Bewegung so groß wird, daß sie durch die Kraft, die der Knabe bei jeder Schwingung aufwendet, gerade gedeckt wird.

Der Erfolg dieses Verfahrens beruht also wesentlich darauf, daß der Knabe seine Kraft immer nur in solchen Augenblicken anwendet, wo er durch sie die Bewegung der Glocke vergrößert. Er muß also seine Kraft periodisch in Tätigkeit setzen, und die Periode dieser Tätigkeit muß gleich der Periode der Glockenschwingungen sein, wenn er Erfolg haben will. Er würde ebensogut die vorhandene Bewegung der Glocke auch schnell zur Ruhe bringen können, wenn er sich an den Strick hinge, während dieser aufsteigt, und so das Gewicht seines Körpers von der Glocke heben ließe.

Ein Versuch ähnlicher Art, der jeden Augenblick anzustellen ist, ist folgender. Man stelle sich einen Pendel her, indem man an das untere Ende eines Fadens einen schweren Körper, z. B. einen Ring, befestigt, fasse das obere Ende des Fadens mit der Hand und setze den Ring in schwache Pendelschwingungen, dann kann man die Pendelschwingungen allmählich sehr bedeutend vergrößern, wenn man jedesmal, wo das Pendel seine größte Abweichung von der Senkrechten erreicht hat, eine ganz kleine Verschiebung der Hand nach der entgegengesetzten Seite macht. Also, wenn das Pendel am meisten nach rechts gegangen ist, bewege man die Hand ein wenig nach links, wenn das Pendel links steht, bewege man sie ein wenig nach rechts. Auch kann man gleich von vornherein Schwingungen des Pendels, wenn es im Anfang ruhig herabhängt, hervorbringen, wenn man dergleichen ganz kleine Verschiebungen der Hand in demselben Takt ausführt, in welchem das Pendel seine Schwingungen macht. Die Verschiebungen der Hand können hierbei so klein sein, daß sie kaum bei gespannter Aufmerksamkeit wahrgenommen werden, ein Umstand, auf welchem die abergläubische Anwendung dieses kleinen Apparates als Wünschelrute beruht. Wenn nämlich der Beobachter, ohne an seine Hand zu denken, den Schwankungen des Ringes mit den Augen folgt, so folgt die Hand leicht den Augen, bewegt sich also unwillkürlich ein wenig hin und her, und zwar gerade in demselben Takt wie das Pendel, wenn dies zufällig anfängt, ein wenig zu

schwanken. Diese unwillkürlichen Schwankungen der Hand werden gewöhnlich übersehen, wenigstens, wenn der Beobachter nicht an genaue Beobachtung solcher unscheinbaren Einflüsse gewöhnt ist. Durch sie wird eben jede vorhandene Pendelschwingung vergrößert und unterhalten, und jede zufällige Bewegung des Ringes leicht in eine Reihe von Pendelschwingungen verwandelt, welche scheinbar von selbst und ohne Zutun des Beobachters eintreten, und deshalb dem Einfluß verborgener Metalle oder Quellen usw. zugeschrieben wurden.

Wenn man dagegen die Bewegungen der Hand absichtlich entgegengesetzt ausführt, als vorgeschrieben ist, so kommt das Pendel bald zur Ruhe.

Die Erklärung des Verfahrens ist einfach. Ist das obere Ende des Fadens unverrückbar befestigt, so fährt das Pendel, einmal angestoßen, lange Zeit in seinen Schwingungen fort, und deren Größe vermindert sich nur sehr langsam. Die Größe der Schwingungen können wir uns gemessen denken durch den Winkel, den der Faden bei seiner äußersten Abweichung von der Vertikallinie mit dieser bildet. Befindet sich nun der angehängte Körper in der äußersten Abweichung nach rechts, und verrücken wir die Hand nach links, so machen wir den Winkel zwischen dem Faden und der Vertikallinie offenbar größer, also auch die Schwingungsweite größer. Würden wir das obere Ende des Fadens in entgegengesetzter Richtung bewegen, so würden wir die Schwingungsweite verkleinern.

Wir brauchen hierbei die Bewegungen der Hand nicht in demselben Takt auszuführen, wie das Pendel schwingt. Wir können auch auf je drei, je fünf oder mehr Pendelschwingungen einen Hin- und Hergang der Hand ausführen, und doch starke Schwingungen erregen. So zum Beispiel: Wenn das Pendel rechts steht, verrücken wir die Hand nach links, halten sie still, bis das Pendel nach links, wieder nach rechts und dann nochmals nach links gekommen ist, gehen zurück in die frühere Lage der Hand, warten bis das Pendel nach rechts, dann nach links, wieder nach rechts gekommen ist, und beginnen nun erst wieder die erste Handbewegung. Dabei kommen drei ganze Pendelschwingungen auf einen Hin- und Hergang der Hand. Ebenso können wir fünf, sieben oder mehr Pendelschwingungen auf eine Handbewegung kommen lassen. Der Sinn dieses

Verfahrens ist immer der, daß die Handbewegung jedesmal nur zu einer solchen Zeit eintreten muß, wo sie der Abweichung des Pendels entgegengerichtet ist, und daher diese vermehrt.

Auch können wir bei einer kleinen Abänderung des Verfahrens zwei, vier, sechs usw. Pendelschwingungen auf eine Handbewegung kommen lassen. Wenn wir nämlich eine plötzliche Verschiebung der Hand eintreten lassen, während das Pendel durch die Vertikallinie geht, so verändert dies die Größe der Schwingungen nicht. Man verschiebe also die Hand nach links, wenn das Pendel rechts steht und beschleunige es dadurch, lasse es nach links kommen, dann, wenn es während des Zurückganges durch die Vertikallinie geht, führe man die Hand in die erste Lage zurück, lasse es das rechte, dann wieder das linke und wieder das rechte Ende seines Bogens erreichen, und beginne nun die erste Handbewegung von neuem.

Wir können also eine kräftige Bewegung des Pendels durch sehr kleine periodische Bewegungen der Hand hervorbringen, deren Periode gleich, oder zwei-, drei-, vier- usw. mal so groß ist, als die Schwingungsdauer des Pendels. Wir haben bisher die Bewegung der Hand als ruckweise betrachtet, das braucht sie aber nicht zu sein. Sie kann auch kontinuierlich in jeder beliebigen anderen Weise vor sich gehen. Bei einer kontinuierlichen Bewegung der Hand wird es im allgemeinen Zeiten geben, wo sie die Bewegung des Pendels vergrößert, und vielleicht auch andere, wo sie diese Bewegung verkleinert. Um das Pendel in starke Schwingungen zu versetzen, wird es darauf ankommen, daß die Beschleunigungen der Bewegung dauernd überwiegen, und sie nicht durch die Summe der Verkleinerungen aufgehoben werden.

Wenn nun eine bestimmte periodische Bewegung der Hand vorgeschrieben wäre, und wir bestimmen wollten, ob dadurch starke Pendelschwingungen hervorgebracht werden können, so würde sich der Erfolg ohne Rechnung nicht immer von vornherein übersehen lassen. Die theoretische Mechanik aber würde folgendes Verfahren vorschreiben, um darüber zu entscheiden: Man zerlege die periodische Bewegung der Hand in eine Summe einfacher pendelartiger Schwingungen der Hand, gerade in derselben Weise, wie wir es im vorigen Abschnitt für die periodischen Bewegungen der Luftteilchen besprochen haben. Ist die Periode einer dieser

Schwingungen gleich der Schwingungsdauer des Pendels, so wird das Pendel in starke Schwingungen versetzt, sonst nicht. Man mag übrigens kleine pendelartige Bewegungen der Hand von anderer Schwingungsdauer zusammensetzen, wie man will, so würden keine dauernden starken Schwingungen des Pendels entstehen. Somit hat hier die Zerlegung in pendelartige Schwingungen eine besondere reelle Bedeutung, von welcher bestimmte mechanische Wirkungen abhängen, und es kann für den hier vorliegenden Zweck keine andere Zerlegung der Handbewegung in irgend welche Partialbewegungen substituiert werden.

In den vorher besprochenen Beispielen konnte das Pendel mitschwingen, wenn die Hand in demselben Takt sich bewegte, wie das Pendel schwang; dann war die längste einfache Partialschwingung der Hand, die dem Grundton einer tönenden Schwingung entspricht, mit dem Pendel in Übereinstimmung. Wenn drei Schwingungen des Pendels auf einen Hin- und Hergang der Hand kamen, war es die dritte Partialschwingung der Hand, gleichsam der Duodezime ihres Grundtones entsprechend, welche das Pendel in Bewegung setzte usw.

Ganz dasselbe, was wir hier für Schwingungen größerer Dauer kennen gelernt haben, gilt nun auch für Schwingungen von so kurzer Dauer wie die Tonschwingungen. Jeder elastische Körper, welcher bei seiner vorhandenen Befestigungsart imstande ist, einmal in Bewegung gesetzt, längere Zeit fortzutönen, kann auch zum Mittönen gebracht werden, wenn ihm eine periodische Erschütterung von vergleichsweise sehr kleinen Exkursionen mitgeteilt wird, deren Periode der Schwingungsdauer seines eigenen Tones entspricht.

Man hebe leise und ohne die Saite anzuschlagen, eine Taste eines Klaviers, so daß die betreffende Saite von ihrem Dämpfer befreit wird, und singe kräftig den Ton dieser Saite in das Innere des Klaviers hinein, so wird man, indem man zu singen aufhört, den Ton aus dem Klavier nachklingen hören. Man wird sich auch leicht überzeugen, daß die dem gesungenen Ton gleichgestimmte Saite es ist, die den Nachhall erzeugt; denn wenn man die Taste losläßt, so daß der Dämpfer sich auf die Saite legt, hört das Nachklingen auf. Noch besser erkennt man das Mitschwingen der Saite, wenn man kleine Papierschnitzelchen auf ihr reiten läßt. Diese werden abgeworfen, sobald die Saite in Schwingung gerät. Die Saite schwingt desto

stärker, je genauer von dem Sänger ihr Ton getroffen ist. Eine sehr kleine Abweichung von der richtigen Tonhöhe läßt das Mitschwingen schon aufhören.

Bei diesem Versuch wird zunächst der Resonanzboden des Instrumentes von den Luftschwingungen getroffen, die die menschliche Stimme erregt. Der Resonanzboden besteht bekanntlich aus einer breiten, biegsamen Holzplatte, welche wegen ihrer großen Oberfläche besser geeignet ist, die Erschütterungen der Saiten an die Luft und der Luft an die Saiten zu übertragen, als es bei der kleinen Berührungsfläche zwischen Luft und Saite direkt geschehen kann. Der Resonanzboden leitet die Erschütterungen, welche die von dem Gesangston erschütterte Luftmasse ihm mitgeteilt hat, zunächst nach den Befestigungspunkten der Saiten hin, und teilt sie diesen mit. Die Größe einer jeden einzelnen solchen Erschütterung ist allerdings verschwindend klein; es müssen sich die Wirkungen einer sehr langen Reihe derselben addieren, bis dadurch eine merkliche Bewegung der Saite entstehen kann, und eine solche fortdauernde Addition der Wirkungen wird in der Tat stattfinden, wie in den vorausgehenden Versuchen mit der Glocke und den Pendeln, wenn die Periode der kleinen Erschütterungen, die die Luft mittels des Resonanzbodens den Enden der Saiten mitteilt, genau deren eigener Schwingungsdauer entspricht. Ist das der Fall, so wird in der Tat die Saite nach einer längeren Reihe von Schwingungen in eine verhältnismäßig zu den Erschütterungen ihrer Endpunkte sehr starke Bewegung gesetzt werden.

Statt der menschlichen Stimme können wir übrigens auch ein beliebiges musikalisches Instrument ertönen lassen; vorausgesetzt nur, daß es den Ton einer der Klaviersaiten rein, stark und ausdauernd angeben kann, so wird es sie mitschwingen machen. Statt des Klaviers wiederum können wir eine Violine, Guitarre, Harfe oder ein anderes Saiteninstrument mit Resonanzboden brauchen, ferner auch gespannte Membranen, Glocken, elastische Platten usw., vorausgesetzt nur, daß die letzteren passend befestigt sind, um, einmal angeschlagen, einen Ton von merklicher Dauer zu geben.

Wenn die Tonhöhe des ursprünglich tönenden Körpers nicht ganz genau der des mittönenden Körpers gleich ist, so schwingt der letztere auch wohl noch mit, aber desto weniger, je größer die Differenz der Tonhöhe ist. In dieser Beziehung zeigen aber die verschie-

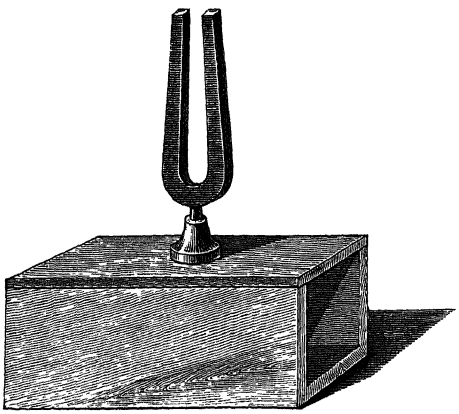
denen tönenden Körper sehr große Unterschiede, je nachdem sie, einmal angestoßen und in Schwingung versetzt, längere oder kürzere Zeit forttönen, ehe sie ihre Bewegung an die Luft abgegeben haben.

Körper von geringer Masse, welche ihre Bewegung leicht an die Luft abgeben und schnell austönen, wie z. B. gespannte Membranen, Saiten einer Violine, sind leicht in Mitschwingung zu versetzen, weil auch rückwärts die Bewegung der Luft wieder leicht auf sie übertragen wird, und sie werden auch von solchen hinreichend starken Lufterschütterungen merklich bewegt, welche nicht ganz die gleiche Schwingungsdauer haben, wie der eigene Ton dieser Körper; daher sind die Grenzen der Tonhöhe ein wenig breiter, durch deren Anstimmen man das Mitschwingen hervorrufen kann. Durch den verhältnismäßig größeren Einfluß der Luftbewegung auf solche leichte und wenig widerstandsfähige elastische Körper kann deren eigene Schwingungsdauer ein wenig verändert werden, so daß sie sich der des erregenden Tones anpaßt. Massige und schwer bewegliche elastische Körper dagegen, welche ihre Schallbewegung nur langsam an die Luft abgeben, wie Glocken und Platten, und lange Zeit nachtönen, sind auch schwer von der Luft aus in Bewegung zu setzen. Es gehört eine viel längere Addition der Wirkungen dazu, und deshalb ist es auch notwendig, die Tonhöhe ihres eigenen Tones viel strenger einzuhalten, wenn man sie in Mitschwingung setzen will. Doch ist bekannt, daß man glockenförmige Gläser, in die man ihren eigenen Ton hineinsingt, in heftige Bewegung setzen kann; es wird sogar erzählt, daß Sänger von starker und reiner Stimme dergleichen Gläser so stark zum Mitschwingen gebracht haben, daß sie zersprangen. Die Hauptschwierigkeit bei diesem Versuch ist nur, bei starker Anstrengung der Stimme die Tonhöhe so sicher und genau und lange festzuhalten, wie es hierzu nötig ist.

Am schwersten sind Stimmgabeln in Mitschwingung zu setzen. Um es zu können, muß man sie auf Resonanzkästen befestigen, die selbst auf den Ton der Gabel abgestimmt sind, wie Fig. 13 zeigt. Hat man zwei dergleichen, die genau gleiche Schwingungsdauer haben, und streicht die eine Gabel mit dem Violinbogen, so fängt auch die andere an mitzuschwingen, selbst wenn sie an einem entfernten Ort desselben Zimmers steht, und man hört die zweite den Ton fortsetzen, wenn man die Schwingungen der ersten dämpft. Es

ist dies einer der auffallendsten Fälle des Mitschwingens, wenn man die schwere und starke Stahlmasse, welche in Bewegung gesetzt wird, vergleicht mit der leichten nachgiebigen Luftmasse, welche diese Wirkungen mittels so geringer Druckkräfte hervorbringt, daß ihre Erschütterung kein Federchen in Bewegung zu setzen vermag, wenn das Federchen nicht etwa auf denselben Ton stimmt, wie die Stimmgabel. Bei solchen Gabeln ist übrigens die Zeit, welche sie brauchen, um durch Mittönen in volle Schwingung zu kommen, von merklicher Größe, und die allerkleinste Verstimmung genügt schon, das Mitschwingen zwischen ihnen sehr merklich zu schwächen. Man braucht zu dem Ende nur ein kleines Stückchen Wachs auf eine der Zinken der zweiten Gabel zu kleben, so daß sie etwa eine Schwingung in der Sekunde weniger macht als die andere; dies genügt, um das Mitschwingen fast ganz aufzuheben, selbst wenn die Differenz der Tonhöhe vom geübtesten Ohr noch kaum aufgefaßt werden kann.

Fig. 13.



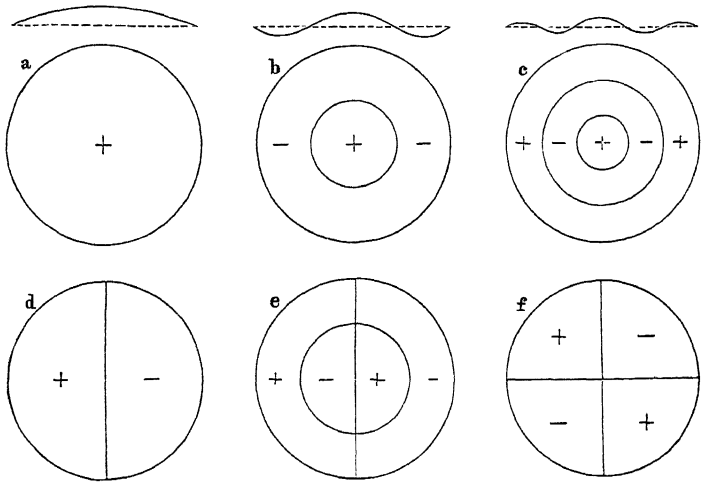
Nachdem wir so die Erscheinung des Mitschwingens im allgemeinen beschrieben haben, müssen wir den Einfluß der verschiedenen Wellenformen des Klanges beim Mittönen untersuchen.

Zunächst ist zu bemerken, daß die meisten elastischen Körper, wenn sie durch irgend eine schwache periodisch wirkende Kraft in anhaltende Schwingungen versetzt werden, mit wenigen Ausnahmen, welche später näher besprochen werden sollen, stets in pendelartige Schwingungen geraten. Meistens können sie aber mehrere Arten solcher Schwingungen ausführen, bei denen sowohl die Schwingungsdauer als auch die Art, wie die Schwingungen über die verschiedenen Teile des schwingenden Körpers verteilt sind, verschieden ist. Den verschiedenen Größen der Schwingungsdauer entsprechen also verschiedene Töne, die ein solcher elastischer Körper hervorbringen kann, die sogenannten eigenen Töne des Körpers, welche aber nur aus-

nahmsweise, wie bei den Saiten und bei den engeren Arten der Orgelpfeifen, in ihrer Tonhöhe den früher erwähnten harmonischen Obertönen eines musikalischen Klanges entsprechen, meistenteils jedoch unharmonisch zum Grundton sind.

In vielen Fällen kann man die Schwingungen und ihre Verteilung über den schwingenden Körper durch ein wenig aufgestreuten feinen Sand leicht sichtbar machen. Nehmen wir z. B. eine Membran (eine tierische Blase oder eine dünne Kautschukmembran), die über einen kreisförmigen Ring gespannt ist. In Fig. 14 sind verschiedene

Fig. 14.



Formen, die eine Membran beim Schwingen annehmen kann, abgebildet. Die Durchmesser und Kreise auf der Fläche der Membran bezeichnen Reihen solcher Punkte, die beim Schwingen in Ruhe bleiben, sogenannte Knotenlinien. Durch die Knotenlinien wird die Fläche in eine Anzahl verschiedener Abteilungen geteilt, welche sich abwechselnd nach oben und nach unten ausbiegen, und zwar so, daß, während die mit + bezeichneten sich nach oben biegen, die mit — bezeichneten es nach unten tun. Über den Figuren *a, b, c* sind die Formen gezeichnet, die die Membran auf einem Querschnitt während der Bewegung zeigen würde. Es sind hier nur diejenigen Formen der Bewegung dargestellt, welche den tiefsten und am leichtesten hervorzubringenden Tönen der Membran entsprechen. Übrigens kann die Zahl der Kreise und Durchmesser beliebig größer werden,

wenn nur die Membran dünn genug und gleichmäßig genug gespannt ist, wodurch man dann immer höhere und höhere Töne erhält. Durch Aufstreuen von Sand lassen sich die gezeichneten Schwingungsfiguren leicht sichtbar machen; sowie die Membran zu schwingen beginnt, sammelt sich der Sand auf den Knotenlinien.

In ähnlicher Weise können die Knotenlinien und Schwingungsformen von ovalen oder viereckigen Membranen, von verschieden gestalteten ebenen elastischen Platten, Stäben usw., sichtbar gemacht werden. Es ist dies eine Reihe sehr interessanter Erscheinungen, die von Chladni entdeckt sind, deren nähere Beschreibung uns aber von unserem Wege abführen würde. Es genüge deshalb, hier den einfachsten Fall, den einer kreisförmigen Membran, näher zu besprechen.

Für die Zeit, innerhalb deren die Membran bei der Schwingungsform *a* 100 Schwingungen ausführt, ist die Schwingungszahl der anderen Formen für luftleeren Raum berechnet, folgende:

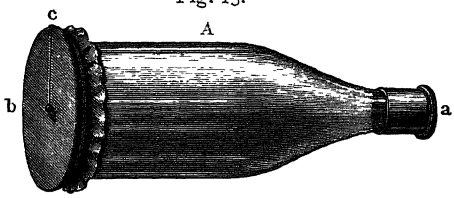
Schwingungsform	Schwingungszahl	Tonhöhe
a ohne Knotenlinie	100	*c*
b mit einem Kreis	229,6	*d'* +
c mit zwei Kreisen	359,9	*b'* +
d mit einem Durchmesser	159	*as*
e mit einem Durchmesser und einem Kreis . .	292	*g'* —
f mit zwei Durchmessern	214	*cis'*

Den Grundton habe ich willkürlich *c* genannt, nur um danach die Intervalle der höheren Töne bezeichnen zu können. Die Töne, welche auf der Membran etwas höher sind als die angegebene Note, sind mit +, die, welche niedriger sind, mit — bezeichnet. Es fehlt hier jedes rationale Verhältnis zwischen dem Grundton und den übrigen Tönen.

Wenn man eine solche Membran ganz dünn mit feinem Sand bestreut und ihren Grundton in der Nähe kräftig angibt, so sieht man den Sand, von den Schwingungen der Membran erschüttert, nach dem Rand hinfliegen und sich dort sammeln. Gibt man einen der anderen Membrantöne an, so sammelt sich der Sand in den betreffenden Knotenlinien der Membran, und man kann daraus leicht erkennen, auf welchen ihrer Töne die Membran geantwortet hat. Ein Sänger, der die Töne der Membran gut zu treffen weiß,

kann leicht aus der Ferne her den Sand nach Belieben in diese oder jene Anordnung bringen, indem er nur die betreffenden Töne kräftig angibt. Doch werden im allgemeinen die einfacheren Figuren der tiefen Töne leichter erzeugt, als die zusammengesetzten der höheren. Am leichtesten ist es, die Membran durch Angabe ihres Grundtones in allgemeine Bewegung zu setzen, und man hat deshalb in der Akustik dergleichen Membranen viel gebraucht, um das Vorhandensein eines bestimmten Tones an bestimmten Stellen des Luftraumes nachzuweisen. Am zweckmäßigsten ist es zu dem Ende, die Membran noch mit einem Luftraum zu verbinden. *A*, Fig. 15, ist eine Glasflasche, deren Mündung bei *a* offen ist, ihr Boden bei *b* ist weggesprengt, und an seiner Stelle eine Membran (nasse Schweinsblase, die man, nachdem sie aufgezogen und befestigt ist, trocknen läßt) aufgespannt. Bei *c* ist mit Wachs ein Kokonfädchen befestigt, welches ein Siegellacktröpfchen trägt. Letzteres hängt wie ein Pendel herab und legt sich gegen die Membran. Sowie die Membran in Schwingung gerät, macht das Pendelchen die heftigsten Sprünge. Die Anwendung eines solchen Pendelchens ist sehr bequem, wenn man keine Verwechselung des Grundtones der Membran mit einem anderen ihrer Eigentöne zu fürchten hat. Es fliegt nicht fort, wie der Sand, und der Apparat ist stets zu seiner Funktion bereit. Will man aber die Töne sicher unterscheiden, welche die Membran in Schwingung versetzen, so muß man die Flasche mit der Mündung nach unten stellen und Sand auf die Membran streuen. Wenn übrigens die Flasche die richtige Größe hat, und die Membran überall gleichmäßig gespannt und befestigt ist, so gibt auch nur der Grundton der Membran (etwas verändert durch die mitschwingende Luftmasse der Flasche) leicht an. Den Grundton der Membran macht man tiefer, wenn man die Größe der Membran oder das Volumen der Flasche größer nimmt, oder die Membran weniger spannt, oder endlich die Öffnung der Flasche verengert.

Fig. 15.



Eine solche Membran, frei oder über den Boden einer Flasche gespannt, wird nun nicht bloß durch Klänge, deren Tonhöhe ihrem

eigenen Ton gleich ist, in Schwingung geraten, sondern auch durch solche, in welchen der eigene Ton der Membran als Oberton enthalten ist. Überhaupt wenn eine beliebige Menge von Wellensystemen in der Luft sich kreuzen, muß man, um zu erfahren, ob die Membran mitschwingen wird, die Bewegung der Luft am Orte der Membran in eine Summe pendelartiger Schwingungen mathematisch zerlegt denken. Ist unter diesen ein Glied, dessen Schwingungsdauer der Schwingungsdauer eines der Membrantöne gleich ist, so wird die betreffende Schwingungsform der Membran eintreten. Fehlen aber bei einer solchen Zerlegung der Luftbewegung die den Membrantönen entsprechenden Glieder, oder sind sie zu klein, so wird die Membran in Ruhe bleiben.

Also auch hier finden wir, daß die Zerlegung der Luftbewegung in pendelartige Schwingungen und die Existenz gewisser Schwingungen dieser Art entscheidend für das Mitschwingen der Membran ist, und es kann hierbei statt der Zerlegung in pendelartige Schwingungen keine andere ähnliche Zerlegung der Luftbewegung substituiert werden. Die pendelartigen Schwingungen, in welche die zusammengesetzte Luftbewegung zerlegt werden kann, beweisen sich hier als wirkungskräftig in der Außenwelt, unabhängig vom Ohr und unabhängig von der mathematischen Theorie. Es bestätigt sich also hierdurch, daß die theoretische Betrachtungsweise, durch welche die Mathematiker zuerst auf diese Art der Zerlegung zusammengesetzter Schwingungen kamen, wirklich in der Natur der Sache begründet ist.

Ich lasse als Beispiel hier noch die Beschreibung eines einzelnen Versuches folgen:

Eine Flasche von der in Fig. 15 abgebildeten Gestalt, mit einer dünnen vulkanisierten Kautschukmembran überspannt, deren schwingender Teil 49 mm im Durchmesser hatte, während die Flasche 140 mm hoch war und in der Messingfassung eine Öffnung von 13 mm Durchmesser hatte, gab angeblasen *fis'*, wobei sich der Sand in einem Kreise nahe dem Rand der Membran aufhäufte. Derselbe Kreis wurde hervorgebracht, wenn ich auf einer Physharmonika denselben Ton *fis'*, oder seine tiefere Oktave *fis*, oder die tiefere Duodezime *H* angab; schwächer gaben auch *Fis* und *D* denselben Kreis. Jenes *fis'* der Membran ist Grundton des Physharmonikaklanges *fis'*, erster Oberton von *fis*, zweiter von *H*, dritter von *Fis*, vierter von *D*. Deshalb

konnten alle diese Noten angeschlagen die Membran in Bewegung setzen, und zwar in Form ihres tiefsten Tones. Ein zweiter kleinerer Kreis, mit 19 mm Durchmesser, wurde durch h' auf der Membran hervorgebracht, derselbe schwächer durch h, spurweise durch die tiefere Duodezime e, also durch die Töne, deren Schwingungszahl $^1/_2$ und $^1/_3$ von der des h' ist.

Dergleichen gespannte Membranen sind nun zu diesen und ähnlichen Versuchen über die Partialtöne von zusammengesetzten Klangmassen sehr brauchbar. Sie haben den großen Vorzug, daß bei ihrer Anwendung das Ohr gar nicht ins Spiel kommt, aber sie sind nicht sehr empfindlich gegen schwächere Töne. In der Empfindlichkeit werden sie bei weitem übertroffen durch die von mir angegebenen Resonatoren. Es sind das gläserne oder metallene Hohlkugeln oder Röhren

Fig. 16 a.

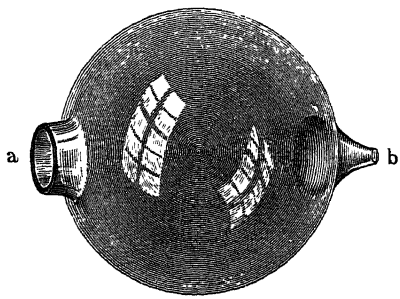


Fig. 16 b.



mit zwei Öffnungen, abgebildet in Fig. 16 a und b. Die eine Öffnung a hat scharf abgeschnittene Ränder, die andere b ist trichterförmig und so geformt, daß man sie in das Ohr einsetzen kann. Die letztere pflege ich mit geschmolzenem Siegellack zu umgeben, und wenn dieser soweit erkaltet ist, daß er zwar mit den Fingern ungestraft berührt werden kann, aber doch noch weich ist, drücke ich diese Öffnung in den Gehörgang ein. Der Siegellack formt sich dann nach der inneren Oberfläche des letzteren, und wenn man später die Kugel an das Ohr setzt, so schließt sie leicht und vollständig dicht. Ein solcher Resonator ist der vorher beschriebenen Resonanzflasche im ganzen sehr ähnlich, nur daß hier an Stelle der dort angewendeten künstlichen elastischen Membran das Trommelfell des Beobachters tritt.

Die Luftmasse eines solchen Resonators in Verbindung mit der des Gehörganges und mit dem Trommelfell bildet ein elastisches System,

welches eigentümlicher Schwingungen fähig ist, und namentlich wird der Grundton der Kugel, welcher viel tiefer ist als alle ihre anderen Eigentöne, durch Mittönen in großer Stärke hervorgerufen. Das Ohr in unmittelbarer Verbindung mit der inneren Luft der Kugel nimmt diesen verstärkten Ton dann auch unmittelbar wahr. Hat man sich das eine Ohr verstopft (am besten durch einen Siegellackpfropfen, den man nach der Gestalt des Gehörganges geformt hat) und setzt an das andere einen solchen Resonator, so hört man die meisten Töne, welche in der Umgebung hervorgebracht werden, viel gedämpfter als sonst; wird dagegen der Eigenton des Resonators angegeben, so schmettert dieser mit gewaltiger Stärke in das Ohr hinein. Es wird dadurch jedermann, auch selbst mit musikalisch ganz ungeübtem oder harthörigem Ohr, in den Stand gesetzt, den betreffenden Ton, selbst wenn er ziemlich schwach ist, aus einer großen Zahl von anderen Tönen herauszuhören, ja man bemerkt den Ton des Resonators sogar zuweilen im Sausen des Windes, im Rasseln der Wagenräder, im Rauschen des Wassers auftauchend. Es sind für diese Zwecke die genannten Resonatoren ein außerordentlich viel empfindlicheres Mittel, als es die abgestimmten Membranen sind. Wenn der wahrzunehmende Ton im Verhältnis zu den begleitenden Tönen sehr schwach ist, ist es vorteilhaft, den Resonator abwechselnd an das Ohr anzusetzen und wieder zu entfernen. Man bemerkt dann leicht, ob der Ton des Resonators beim Ansetzen zum Vorschein kommt oder nicht, während man einen gleichmäßig anhaltenden Ton nicht so leicht wahrnimmt.

Eine abgestimmte Reihe solcher Resonatoren ist deshalb ein wichtiges Mittel. Einerseits erlaubt es dem musikalisch ungeübten Ohr, eine Menge von Untersuchungen durchzuführen, bei denen es darauf ankommt, einzelne schwache Töne neben anderen stärkeren deutlich wahrzunehmen, wie die Kombinationstöne, Obertöne und eine Reihe von anderen, später zu beschreibenden Erscheinungen bei den Akkorden, zu deren Beobachtung ohne solche Hilfe ein geübtes musikalisches Ohr oder eine sehr angestrengte und zweckmäßig unterstützte Anspannung der Aufmerksamkeit gehört; weshalb auch bisher die genannten Phänomene nur der Beobachtung weniger Individuen zugänglich waren, und eine Menge von Physikern und selbst Musikern existierten, denen es niemals gelungen

war, sie zu unterscheiden. Andererseits gelingt es nun auch dem geübten Ohr, die Analyse einer Tonmasse, unterstützt von den Resonatoren, viel weiter zu treiben, als es bisher der Fall war. Ohne sie würde es mir schwerlich gelungen sein, die Beobachtungen, welche im folgenden beschrieben werden sollen, so genau und so sicher anzustellen, als ich es jetzt gekonnt habe [1]).

Es ist hierbei wohl zu bemerken, daß das Ohr den betreffenden Ton nur insofern stärker hört, als derselbe in der Luftmasse des Resonators eine größere Intensität erreicht. Nun lehrt übrigens die mathematische Theorie der Luftbewegungen, daß, solange wir es mit hinreichend kleinen Schwingungen zu tun haben, die Luft im Resonator Pendelschwingungen von eben denselben Perioden ausführt, wie die äußere Luft, und keine anderen, und daß nur die Intensität derjenigen Pendelschwingungen, deren Periode dem Eigenton des Resonators entspricht, eine bedeutende Stärke erreicht, die Intensität aller anderen aber desto geringer bleibt, je mehr ihre Höhe von der des Eigentones abweicht. Das mit dem Resonator verbundene Ohr kommt hierbei gar nicht weiter in Betracht, als daß sein Trommelfell die Luftmasse desselben abschließen hilft. In theoretischer Beziehung ist der Apparat den früher beschriebenen Flaschen mit schwingender Membran, Fig. 15, ganz gleichartig, nur wird seine Empfindlichkeit dadurch außerordentlich gesteigert, daß die elastische Membran des Resonators gleichzeitig das Trommelfell des Ohres ist und in direkter Verbindung mit den empfindenden Nervenapparaten dieses Organes steht. Wir bekommen also einen starken Ton im Resonator nur, wenn bei der Zerlegung der Luftbewegung des äußeren Raumes in pendelartige Schwingungen eine Pendelschwingung von der Periode des Eigentones des Resonators vorkommt, und auch hier wiederum würde keine andere Art der Zerlegung als die in pendelartige Schwingungen ein richtiges Resultat geben.

Man kann sich durch Versuche von den angegebenen Eigenschaften der Resonatoren leicht überzeugen. Man setze einen solchen an das Ohr und lasse irgend ein mehrstimmiges Musikstück von beliebigen Instrumenten ausführen, in dem öfters der Eigenton des Resonators vorkommt. So oft dieser Ton angegeben wird, wird das

[1]) Über Maße und verschiedene Formen der Resonatoren siehe Beilage II.

mit dem Resonator bewaffnete Ohr ihn gellend durch alle anderen Töne des Akkordes hindurchdringen hören.

Schwächer wird es ihn aber oft auch hören, wenn tiefere Klänge angegeben werden, und zwar zeigt die nähere Untersuchung zunächst, daß dies geschieht, wenn Klänge angegeben werden, zu deren harmonischen Obertönen der Eigenton des Resonators gehört. Man nennt dergleichen tiefere Klänge auch wohl die harmonischen Untertöne des Resonatortones. Es sind die Klänge, deren Schwingungsperiode gerade zwei-, drei-, vier-, fünf- usw. mal größer ist, als die des Resonatortones. Ist dieser also z. B. c'', so hört man ihn tönen, wenn ein musikalisches Instrument angibt: c', f, c, As, F, D, C usw. In diesen Fällen tönt der Resonator durch einen der harmonischen Obertöne des im äußeren Luftraum angegebenen Klanges. Doch ist zu bemerken, daß nicht immer alle harmonischen Obertöne in den Klängen der einzelnen Instrumente vorkommen, und daß sie bei verschiedenen auch sehr verschiedene Stärke haben. Bei den Tönen der Geigen, des Klaviers, der Physharmonika sind die ersten 5 oder 6 meist deutlich vorhanden. Über die Obertöne der Saiten folgt genaueres im nächsten Kapitel. Auf der Physharmonika sind die ungeradzahligen Töne meist stärker als die geradzahligen. Ebenso hört man die Obertöne mittels der Resonatoren deutlich bei den Gesangstönen der menschlichen Stimme, aber verschieden stark bei verschiedenen Vokalen, worauf wir später zurückkommen.

Unter den Körpern, welche starken Mitschwingens fähig sind, sind noch die Saiten zu nennen, welche, wie im Pianoforte, mit einem Resonanzboden verbunden sind.

Die Saiten unterscheiden sich nur dadurch einigermaßen von den bisher genannten mitschwingenden Körpern, daß ihre verschiedenen Schwingungsformen Töne geben, die den harmonischen Obertönen des Grundtones entsprechen, während bei Membranen, Glocken, Stäben usw. die Nebentöne, welche den anderen Schwingungsformen entsprechen, unharmonisch zum Grundton sind, und die Luftmassen der Resonatoren ebenfalls meist unharmonische, nur sehr hohe Obertöne geben, deren Verstärkung im Resonator sehr unbedeutend ist.

Die Schwingungen von Saiten kann man entweder studieren an schwach gespannten, nicht tönenden elastischen Fäden, deren Schwin-

gungen so langsam sind, daß man ihnen mit der Hand und mit dem Auge folgen kann, oder an tönenden Saiten, wie denen des Klaviers, der Guitarre, des Monochords oder der Violine. Die ersteren, nicht tönenden Saiten verfertigt man sich aus einer 6 bis 10 Fuß langen Spiralfeder von dünnem Messingdraht. Selbige wird schwach ausgespannt und an beiden Enden befestigt. Eine solche Saite kann Schwingungen von sehr großen Exkursionen und großer Regelmäßigkeit machen, die leicht von einem großen Auditorium gesehen werden. Man erregt ihre Schwingungen, wenn man nahe dem einen Ende die Saite mit den Fingern in passendem Takte hin und her bewegt.

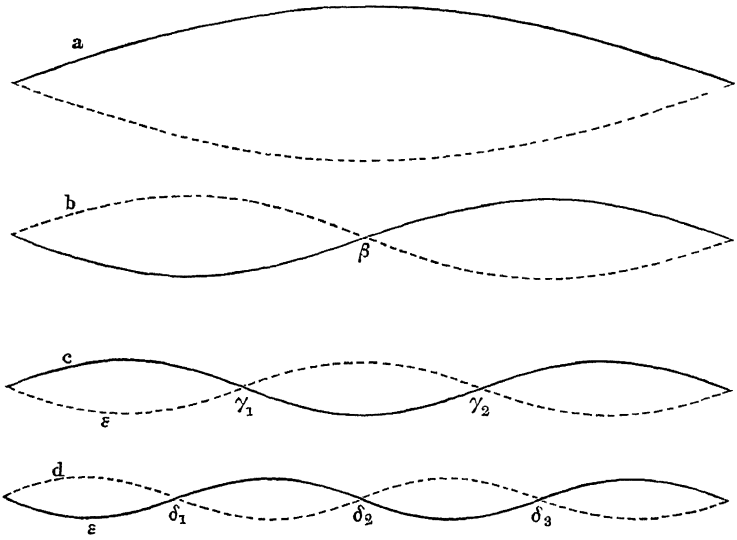
Eine Saite kann zunächst so in Schwingung gesetzt werden, wie Fig. 17 zeigt, daß ihre Form bei der Entfernung aus der Gleichgewichtslage stets der Form einer halben einfachen Welle gleich ist. Die Saite gibt dabei nur einen Ton, und zwar den tiefsten, den sie überhaupt hervorbringen kann, ohne daß noch andere harmonische Nebentöne zu hören sind.

Die Saite kann aber während der Bewegung auch die Formen Fig. 17 *b*, *c*, *d* annehmen. Die Form der Saite ist in diesen Figuren gleich zwei, drei, vier halben Wellenlängen einer einfachen Wellenlinie. Bei der Schwingungsform *b* läßt die Saite keinen anderen Ton als die höhere Oktave ihres Grundtones hören, bei *c* die Duodezime, bei *d* die zweite Oktave. Durch die punktierten Linien ist die Lage der Saite nach einer halben Schwingungszeit aufgezeichnet. Bei *b* bleibt der Punkt β der Saite ganz in Ruhe, bei *c* ruhen zwei Punkte, nämlich γ_1 und γ_2, bei *d* drei Punkte, δ_1, δ_2, δ_3. Man nennt diese Punkte Knotenpunkte. An einer schwingenden Messingspirale erkennt man sie leicht mit dem Auge, an einer tönenden Saite dadurch, daß man ganz kleine Papierschnitzelchen auflegt, die von den bewegten Stellen der Saite abgeworfen werden, an den Knotenpunkten aber liegen bleiben. Wenn die Saite also durch einen Knotenpunkt in zwei schwingende Abteilungen geteilt ist, gibt sie einen Ton, dessen Schwingungszahl doppelt so groß ist als die des Grundtones. Bei drei Abteilungen ist die Schwingungszahl die dreifache, bei vier die vierfache.

Eine Messingspirale bringt man dazu, in diesen verschiedenen Formen zu schwingen, wenn man sie entweder nahe ihrem einen Ende mit dem Finger taktmäßig bewegt, und zwar für die Form *a* im Takt ihrer langsamsten Schwingungen, für *b* doppelt, für *c* drei-

fach, für d vierfach so schnell. Oder man unterstützt einen der Knotenpunkte, der dem Ende der Saite am nächsten ist, lose mit den Fingern und zupft die Saite zwischen diesem Knotenpunkt und dem nächsten Ende. Also wenn man γ_1 in Fig. 17 c, oder δ_1 in Fig. 17 d festhält, zupft man bei ε; dann treten bei der Schwingung auch die anderen Knotenpunkte hervor.

Fig. 17.



An einer tönenden Saite bringt man die Schwingungsformen der Fig. 17 am reinsten hervor, wenn man auf ihren Resonanzboden eine angeschlagene Stimmgabel aufsetzt, welche den Ton gibt, der der entsprechenden Schwingungsform angehört. Will man nur eine bestimmte Anzahl von Knotenpunkten herstellen, ohne zu verlangen, daß die einzelnen Punkte der Saite einfache Schwingungen ausführen, so genügt es, einen der verlangten Knotenpunkte mit dem Finger leise zu berühren und die Saite anzuschlagen oder mit dem Bogen zu streichen. Durch die Berührung der Saite mit dem Finger dämpft man alle diejenigen einfachen Schwingungen derselben, welche keinen Knotenpunkt an der berührten Stelle haben, und es bleiben nur diejenigen übrig, welche die Saite dort ruhen lassen.

Die Zahl der Knotenpunkte kann bei langen dünnen Saiten ziemlich groß werden, bis endlich die Stücke der Saite zwischen je zwei

Knotenpunkten zu kurz und steif werden, um noch tönen zu können. Sehr feine Saiten geben deshalb mehr hohe Töne als dickere. Auf der Violine und an den tieferen Klaviersaiten bringt man wohl noch Töne mit zehn Abteilungen der Saite hervor; an sehr feinen Drahtsaiten kann man aber selbst noch Töne mit 16 oder 20 Abteilungen der Saite ansprechen lassen.

Die bisher beschriebenen Schwingungsformen der Saiten sind diejenigen, bei denen jeder Punkt der Saite sich in pendelartiger Schwingung hin und her bewegt. Diese Bewegungen erregen im Ohr deshalb immer nur die Empfindung eines einzigen Tones. Bei allen anderen Bewegungsformen der Saiten sind die Schwingungen nicht einfach pendelartig, sondern geschehen nach einem abweichenden verwickelteren Gesetz. Dies ist immer der Fall, wenn man die Saite in der gewöhnlichen Weise mit den Fingern zupft (Guitarre, Harfe, Zither) oder schlägt (Klavier) oder mit dem Violinbogen streicht. Die dann entstehenden Bewegungen können angesehen werden, als wären sie zusammengesetzt aus vielen einfachen Schwingungen, welche einzeln den in Fig. 17 abgebildeten entsprechen. Die Mannigfaltigkeit solcher zusammengesetzter Bewegungsformen ist unendlich groß, ja es kann die Saite während ihrer Bewegung jede beliebige Form annehmen (vorausgesetzt, daß man sich immer auf sehr kleine Abweichungen von der Gleichgewichtslage beschränkt), weil aus einer Anzahl solcher einfacher Wellen, wie sie in Fig. 17 *a*, *b*, *c*, *d* dargestellt sind, nach dem im zweiten Abschnitt Gesagten jede beliebige Wellenform zusammengesetzt werden kann. Eine gezupfte, geschlagene, gestrichene Saite läßt demgemäß auch neben ihrem Grundton eine große Zahl von harmonischen Obertönen hören, desto mehr in der Regel, je feiner sie ist. Der eigentümlich klimpernde Klang sehr feiner Metallsaiten verdankt offenbar diesen hohen Nebentönen seinen Ursprung. Man kann leicht mit Hilfe der Resonatoren die Töne bis zum sechzehnten unterscheiden. Die höheren rücken einander zu nahe, um sie noch deutlich zu trennen.

Wenn also eine Saite durch einen musikalischen Klang, der im umgebenden Luftraum erregt worden ist, und der ihrem Grundton an Höhe entspricht, in Mitschwingung versetzt wird, so werden in der Regel eine ganze Reihe verschiedenartiger einfacher Schwingungsformen der Saite gleichzeitig erregt werden. Wenn nämlich der

Grundton des Klanges dem Grundton der Saite entspricht, so entsprechen auch alle harmonischen Obertöne des Klanges den Obertönen der Saite und können deshalb die entsprechende Schwingungsform der Saite erregen. Überhaupt wird die Saite durch Luftschwingungen so oft in Mitschwingung gebracht werden, als bei der Zerlegung jener Luftschwingungen in einfache Schwingungen darin Glieder vorkommen, deren Schwingungsperiode einem der Saitentöne entspricht. In der Regel werden sich aber, wenn ein solches Glied vorhanden ist, noch mehrere finden, und es wird in vielen Fällen schwer zu ermitteln sein, durch welche Töne unter denen, welche sie angeben kann, die Saite in Bewegung gesetzt ist. Deshalb sind die gewöhnlichen unbelasteten Saiten nicht so gut wie Membranen oder die Luftmassen der Resonatoren zu gebrauchen, um durch ihr Mitschwingen die in einer Klangmasse vorhandenen Töne zu finden.

Um Versuche am Klavier über das Mitschwingen der Saiten anzustellen, hebe man den Deckel des Instrumentes, so daß die Saiten frei liegen, drücke dann die Taste der Saite, welche mitschwingen soll, etwa c', langsam herab, ohne den Hammer zum Anschlag zu bringen, und lege quer über die Saiten des c' ein kleines Holzsplitterchen. Man wird finden, daß das Splitterchen in Bewegung gerät, oder selbst abgeworfen wird, wenn man gewisse andere Saiten des Klaviers anschlägt; die Bewegung des Splitterchens ist am stärksten, wenn einer der Untertöne des c' angeschlagen wird, also c, F, C, As_1, F_1, D_1 oder C_1. Mäßigere Bewegung tritt auch ein, wenn einer der Obertöne des c' angeschlagen wird, c'', g'' oder c''', doch bleibt im letzteren Falle das Hölzchen liegen, wenn man es auf die betreffenden Knotenpunkte der Saiten legt. Legt man es z. B. in die Mitte der Saite, so bleibt es ruhig beim c'' und c''' und bewegt sich beim g''. Legt man es auf $^1/_3$ der Saitenlänge, so bleibt es ruhig beim g'', bewegt sich beim c'' und c'''. Endlich kann die Saite c' auch noch in Bewegung gesetzt werden, wenn man einen Unterton eines ihrer Obertöne angibt, z. B. die Note f, deren dritter Partialton c'' identisch mit dem zweiten von c' ist. Auch hier bleibt das Hölzchen ruhend, wenn man es in die Mitte der Saite c' legt, wo der Knotenpunkt des Tones c'' ist. Ebenso bewegt sich die Saite c', aber mit Bildung von zwei Knotenpunkten, wenn man g', g oder es angibt, welchen Tönen mit dem c' der Oberton g'' gemeinsam ist.

Ich bemerke noch, daß man am Klavier, wo das eine Ende der Saiten verdeckt zu sein pflegt, die Lage der Knotenpunkte leicht findet, wenn man den Finger leise an die beiden Saiten des betreffenden Tones andrückt und die Taste anschlägt. Berührt der Finger einen der Knotenpunkte, so ertönt der betreffende Oberton rein und laut. Sonst ist der Ton der Saite matt und schlecht.

Solange nur ein Oberton der Saite c' erregt wird, kann man die betreffenden Knotenpunkte auffinden, und dadurch ermitteln, welche ihrer Schwingungsformen erregt ist. Das ist aber auf dem beschriebenen mechanischen Wege nicht mehr möglich, wenn zwei Obertöne gleichzeitig erregt werden, z. B. c'' und g''; falls diese beiden Noten gleichzeitig angeschlagen werden, dann ist die ganze Saite in Bewegung.

Wenn aber auch die Verhältnisse bei den Saiten für die Beobachtung verwickelter erscheinen, so ist ihr Mitschwingen doch demselben Gesetz unterworfen, wie das der Resonatoren, der Membranen und anderer elastischer Körper. Es entscheidet sich immer durch die Zerlegung der vorhandenen Schallbewegungen in einfache pendelartige Schwingungen. Stimmt die Periode von einer dieser Schwingungen mit der Periode eines der Eigentöne des elastischen Körpers überein, sei dieser nun eine Saite, eine Membran oder eine Luftmasse, so wird derselbe in starke Mitschwingung versetzt.

Dadurch ist nun eine reelle Bedeutung für die Zerlegung der Schallbewegung in pendelartige einfache Schwingungen gewonnen, welche jeder anderen ähnlichen Zerlegung abgehen würde. Jedes einzelne einfache Wellensystem pendelartiger Schwingungen existiert als ein für sich bestehendes mechanisches Ganze, verbreitet sich, setzt andere elastische Körper von entsprechendem Eigenton in Bewegung, ganz unabhängig von den gleichzeitig sich ausbreitenden anderen einfachen Tönen von anderer Tonhöhe, die aus derselben oder einer anderen Tonquelle hervorgehen mögen. Jeder einzelne Ton kann denn auch, wie wir gesehen haben, durch rein mechanische Mittel, nämlich mittönende Körper, aus der Klangmasse ausgesondert werden. Jeder einzelne Partialton existiert also ebensogut und in demselben Sinne in dem Klang, den ein einzelnes musikalisches Instrument hervorbringt, wie z. B. in dem weißen Licht, das von der Sonne oder irgend einem glühenden Körper ausgeht, die verschiedenen

Farben des Regenbogens existieren. Das Licht ist auch nur eine schwingende Bewegung eines besonderen elastischen Mediums, des Lichtäthers, wie der Schall eine der Luft ist. In einem Strahle weißen Lichtes findet eine Art der Bewegung statt, welche dargestellt werden kann als eine Summe vieler periodischer Bewegungen von verschiedener Schwingungsdauer, die den einzelnen Farben des Sonnenspektrums entsprechen. Aber natürlich hat ein jedes Ätherteilchen in jedem Augenblick nur eine bestimmte Geschwindigkeit und nur eine bestimmte Abweichung von seiner Gleichgewichtslage, gerade wie die einzelnen Luftteilchen in einem von vielen Tonwellenzügen durchzogenen .Raum. Die wirklich bestehende Bewegung jedes Ätherteilchens ist natürlich immer nur eine einzige; daß wir sie theoretisch als zusammengesetzt betrachten, ist in gewissem Sinne willkürlich. Aber auch die Lichtwellenbewegung kann durch äußere mechanische Mittel in die den einzelnen Farben entsprechenden Wellenzüge zerlegt werden, sei es durch Brechung in einem Prisma, sei es mittels feiner Gitter, durch die man das Licht gehen läßt, und mechanisch besteht jeder einfache Wellenzug des Lichtes, der einer einfachen Farbe entspricht, ganz für sich und unabhängig von allen anderen Farben.

Wir dürfen es also nicht für eine Täuschung des Ohres oder eine Einbildung erklären, wenn wir in dem Klang einer einzelnen Note irgend eines musikalischen Instrumentes viele Partialtöne unterscheiden, wozu ich Musiker, trotzdem sie diese Töne selbst deutlich hörten, wohl zuweilen geneigt gefunden habe. Wir müßten dann auch die Farben des Spektrums, welche aus dem weißen Licht ausgeschieden werden, für Sinnestäuschung halten. Die wirkliche objektive Existenz der Partialtöne läßt sich eben jeden Augenblick durch eine mitschwingende Membran, die ihren Sand emporwirft, erweisen.

Ich bemerke schließlich noch, daß ich mich in diesem Abschnitt betreffs der Bedingungen, von denen das Mittönen abhängt, vielfach auf die mechanische Theorie der Luftbewegung habe berufen müssen. Da es sich in der Lehre von den Schallwellen um wohlbekannte, rein mechanische Kräfte, die des Luftdruckes nämlich, und um Bewegungen der materiellen Luftteilchen handelt, nicht um irgend welche hypothetische Erklärung, so ist die theoretische Mechanik in diesem Gebiet auch von einer vollkommen unanfechtbaren Autorität; ihre Resultate

müssen freilich von dem der mathematischen Studien unkundigen Leser auf Treu und Glauben hingenommen werden. Ein experimenteller Weg der Prüfung der bezüglichen Fragen wird im nächsten Abschnitt beschrieben werden, wo die Gesetze der Zerlegung der Klänge durch das Ohr festzustellen sind. Genau ebenso, wie dort für das Ohr, läßt sich der experimentelle Beweis auch für mitschwingende Membranen und Luftmassen führen, und die Gleichheit der Gesetze für beide wird sich dort herausstellen [1]).

[1]) Optische Hilfsmittel, um schwache, mitschwingende Bewegungen räsonierender Lufträume wahrnehmbar zu machen, sind in Beilage II beschrieben. Diese Mittel sind wertvoll, um die Tatsachen Hörern zu demonstrieren, die an Beobachtung und Unterscheidung musikalischer Töne nicht gewöhnt sind.

Vierter Abschnitt.

Von der Zerlegung der Klänge durch das Ohr.

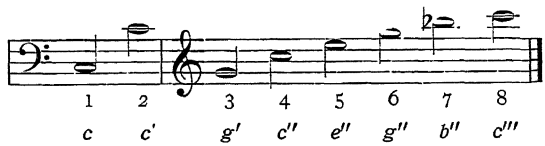
Es ist in den vorausgehenden Abschnitten schon mehrfach erwähnt worden, daß musikalische Klänge auch durch das menschliche Ohr allein, ohne daß irgend welche Unterstützung durch besondere Apparate nötig wäre, in eine Reihe von Partialtönen zerlegt werden, die den einfachen pendelartigen Schwingungen der Luftmasse entsprechen, also in dieselben Bestandteile, in welche die Bewegung der Luft auch durch mittönende elastische Körper zerlegt wird. Wir gehen jetzt daran, die Richtigkeit dieser Behauptung zu erweisen.

Jemand, der zum erstenmal sich bemüht, die Obertöne musikalischer Klänge aufzusuchen, wird gewöhnlich beträchtliche Schwierigkeit finden, sie überhaupt auch nur zu hören.

Die Analyse unserer Sinnesempfindungen, wenn sie sich nicht entsprechenden Unterschieden der äußeren Objekte anschließen kann, stößt auf eigentümliche Hindernisse, deren Natur und Bedeutung wir weiter unten näher besprechen werden. Es muß in der Regel die Aufmerksamkeit des Beobachters durch besondere, passend gewählte Hilfsmittel auf die wahrzunehmende Erscheinung hingeleitet werden, bis er sie genau kennt; nachdem dies gelungen ist, kann er dann später jeder Unterstützung entbehren. Ähnliche Schwierigkeiten treten auch der Beobachtung der Obertöne eines Klanges entgegen. Ich lasse hier zunächst die Beschreibung solcher Verfahrungsweisen folgen, mittels deren es einem ungeübten Beobachter am leichtesten ist, die Obertöne zuerst kennen zu lernen. Ich bemerke dabei, daß ein musikalisch geübtes Ohr die Obertöne nicht notwendig leichter und sicherer hört, als ein ungeübtes. Es kommt hier vielmehr auf eine gewisse Abstraktionskraft des Geistes an, auf eine gewisse Herrschaft über die Aufmerksamkeit, als auf musikalische Übung. Doch hat

ein musikalisch geübter Beobachter darin einen wesentlichen Vorzug vor dem ungeübten, daß er sich leicht vorstellt, wie die Töne klingen müssen, welche er sucht, während der Ungeübte sich diese Töne immer wieder angeben muß, um ihren Klang frisch in der Erinnerung zu haben.

Zunächst ist zu bemerken, daß man in der Regel die ungeradzahligen Partialtöne, also die Quinten, Terzen, Septimen usw. des Grundtones leichter hört, als die geradzahligen, welche Oktaven entweder des Grundtones oder anderer tieferer Partialtöne sind, wie man auch in einem Akkord leichter hört, ob Quinten und Terzen darin sind, als Oktaven. Der zweite, vierte und achte Partialton sind höhere Oktaven des Grundtones, der sechste eine höhere Oktave des dritten, der Duodezime; diese zu unterscheiden, erfordert schon einige Übung. Unter den ungeradzahligen, welche leichter zu hören sind, steht durch ihre Stärke meistens voran der dritte Ton, die Duodezime des Grundtones oder Quinte seiner ersten höheren Oktave, dann folgt der fünfte Partialton als Terz und meist schon sehr schwach der siebente als kleine Septime der zweiten höheren Oktave des Grundtones, wie das folgende Notenbeispiel zeigt, welches die Partialtöne des Klanges *c* angibt:



Will man anfangen, Obertöne zu beobachten, so ist es ratsam, unmittelbar vor dem Klang, welcher analysiert werden soll, ganz schwach diejenige Note erklingen zu lassen, welche man aufsuchen will, und zwar am besten in derselben Klangfarbe, welche der Gesamtklang hat. Sehr geeignet sind zu diesen Versuchen das Klavier und das Harmonium, welche beide ziemlich starke Obertöne geben.

Man schlage auf einem Klavier zuerst das *g'* des obigen Notenbeispiels an, und indem man die Taste *g'* sinken läßt, so daß deren Saiten nicht mehr fortklingen können, gleich darauf kräftig die Note *c*, in deren Klang *g'* der dritte Partialton ist, und halte die Aufmerksamkeit fest gerichtet auf die Tonhöhe des eben gehörten *g'*, so wird

man diesen Ton nun auch aus dem Klang *c* heraushören. Ebenso wenn man zuerst ganz leise den fünften Ton *e''*, dann *c* anschlägt. Oft werden diese Obertöne deutlicher, wenn man die Saite ausklingen läßt, indem sie, wie es scheint, langsamer an Stärke abnehmen, als der Grundton. Der siebente und neunte Partialton *b''* und *d'''* sind auf den Klavieren von neuerer Konstruktion meist schwach oder gar nicht vorhanden. Stellt man dieselben Versuche am Harmonium an, namentlich an einem seiner schärferen Register, so hört man den siebenten Ton meist noch gut, auch wohl den neunten.

Um den oft gehörten Einwand zu widerlegen, daß der Beobachter sich nur einbilde, den Oberton in der Klangmasse zu hören, weil er ihn kurz vorher isoliert gehört hat, will ich hier nur anführen, daß, wenn man an einem gut nach gleichschwebender Temperatur gestimmten Klavier das *e''* erst als Partialton von *c* hört, dann direkt anschlägt, man ganz deutlich hören kann, daß es im letzteren Falle etwas höher ist. Das ist Folge der Stimmung nach gleichschwebender Temperatur. Da also ein Unterschied der Tonhöhe zwischen beiden Tönen erkannt wird, ist sicherlich der eine nicht Fortsetzung im Ohr oder Erinnerung des anderen. Andere Tatsachen, welche dieselbe Meinung vollständig widerlegen, folgen später.

Noch geeigneter als das beschriebene Verfahren am Klavier ist es, an irgend einem beliebigen Saiteninstrument, Klavier, Monochord, Violine, den Ton, welchen man zu hören wünscht, zuerst als Flageolettton der Saite hervorzubringen, indem man diese anschlägt oder streicht, während man einen Knotenpunkt des betreffenden Tones auf der Saite berührt. Dadurch wird die Ähnlichkeit des zuerst gehörten Tones mit dem entsprechenden Teilton der Klangmasse noch größer und das Ohr findet deshalb letzteren leichter heraus. An den Monochorden pflegt sich ein geteilter Maßstab neben der Saite zu befinden, mit dessen Hilfe man die Lage der Knotenpunkte leicht berechnen kann. Die Knotenpunkte für den dritten Ton teilen, wie schon im vorigen Abschnitt bemerkt ist, die Saite in drei gleiche Teile, die für den fünften in fünf usw. Am Klavier und an der Violine findet man die Lage dieser Punkte leicht durch den Versuch, indem man die Saite in der Nähe des gesuchten Knotenpunktes, dessen Lage man ja nach dem Augenmaß annähernd bestimmen kann, leise mit dem Finger

berührt, dann die Saite anschlägt oder streicht, und den Finger so lange hin und her schiebt, bis der verlangte Flageoletton kräftig und rein klingend zum Vorschein kommt. Indem man nun die Saite zum Tönen bringt, bald mit Berührung des Knotenpunktes, bald ohne solche Berührung, bekommt man bald den gesuchten Oberton allein als Flageoletton, bald die ganze Klangmasse der Saite, und erkennt verhältnismäßig leicht, daß auch in dieser der betreffende Oberton enthalten ist. Bei dünnen Saiten, welche die hohen Obertöne stark geben, ist es mir auf diese Weise gelungen, die Obertöne bis zum sechzehnten hinauf einzeln zu erkennen. Die noch höheren Obertöne kommen zu nahe aneinander zu liegen, als daß sie das Ohr noch leicht voneinander scheiden könnte.

Namentlich empfehle ich bei solchen Versuchen folgendes Verfahren. Man berühre den Knotenpunkt der Saite am Klavier oder Monochord mit den Haaren eines kleinen Malerpinsels, schlage an und entferne unmittelbar danach auch den Pinsel von der Saite. Hat man den Pinsel fest an die Saite gelegt, so hört man entweder allein den betreffenden Oberton als Flageoletton oder doch den Grundton nur schwach daneben. Wiederholt man nun den Anschlag der Saite, indem man die Berührung des Pinsels immer leiser und leiser macht und zuletzt den Pinsel ganz entfernt, so wird neben dem Oberton auch der Grundton der Saite mehr und mehr hörbar, bis man zuletzt den vollen natürlichen Klang der freien Saite hat. Dadurch gewinnt man eine Reihe allmählicher Übergänge zwischen dem isolierten Oberton und dem zusammengesetzten Klang, in welchen der erstere leicht vom Ohr festgehalten wird. Durch dieses zuletzt beschriebene Verfahren ist es mir meist gelungen, auch ganz ungeübten Hörern die Existenz der Obertöne zu demonstrieren.

Schwerer als an Saiteninstrumenten, am Harmonium und an den schärferen Registern der Orgel, ist es, im Anfang die Obertöne der meisten Blasinstrumente und der menschlichen Stimme wahrzunehmen, weil man hier nicht so bequem den Oberton in gleichartiger Klangfarbe schwach vorher hören lassen kann. Doch gelingt es bei einiger Übung bald, mittels eines Klaviertones das Ohr auf den Oberton hinzuleiten, den es hören soll. Verhältnismäßig am schwersten zu isolieren sind die Partialtöne der menschlichen Stimme aus später anzuführenden Gründen. Übrigens sind die Obertöne der Stimme schon

von Rameau[1]) unterschieden worden, und zwar ohne alle künstliche Unterstützung. Man verfahre folgendermaßen: Eine Baßstimme lasse man die Note *es* aushalten, und zwar auf den Vokal *O*; man schlage schwach das *b'* des Klaviers, als dritten Partialton der Note *es*, an und lasse es verklingen, während man aufmerksam darauf hin hört. Scheinbar wird die Note *b'* des Klaviers nicht verklingen, sondern anhalten, auch wenn man zuletzt die Taste losläßt, indem das Ohr unvermerkt von dem Ton des Klaviers hinübergleitet auf den gleichlautenden Partialton des Sängers, und diesen für die Fortsetzung des Klaviertones hält. Aber sobald die Taste losgelassen ist und der Dämpfer auf der Saite liegt, ist es unmöglich, daß diese noch weiter töne. Will man den entsprechenden Versuch für den fünften Oberton von *es*, nämlich *g''*, machen, so ist es besser, wenn der Sänger den Vokal *A* wählt.

Ein anderes sehr gutes Mittel zu diesem Zweck, welches für die Klänge aller musikalischen Instrumente angewendet werden kann, geben die im vorigen Abschnitt beschriebenen Resonanzkugeln ab. Wenn man an das Ohr die Resonanzkugel setzt, welche irgend einem bestimmten Oberton, z. B. *g'* des Klanges *c*, entspricht, und dann den Klang *c* angibt, so hört man das *g'* durch die Kugel um vieles verstärkt. Daß man in diesem Falle das *g'* hört und unterscheidet, beweist nun noch nicht, daß das Ohr an und für sich ohne Hilfe der mittönenden Kugel den Ton *g'* im Klang *c* hören würde. Aber wohl kann man diese Verstärkung durch die Kugel benutzen, um das Ohr auf den Ton, den es hören soll, aufmerksam zu machen. Wenn man nachher die Kugel allmählich wieder vom Ohr entfernt, so wird das *g'* schwächer; indessen die Aufmerksamkeit, welche einmal darauf gerichtet worden ist, bleibt nun leichter an diesen Ton gefesselt, und der Beobachter hört diesen Ton nun auch in dem natürlichen unveränderten Klang der angegebenen Note mit nicht unterstütztem Ohr. Es soll also die Resonanzkugel hierbei nur dazu dienen, das Ohr aufmerksam zu machen auf den Ton, den es hören soll.

Jemand, der oft dergleichen Versuche anstellt, um die Obertöne zu hören, lernt sie immer leichter finden, endlich auch ohne daß er ein besonderes Hilfsmittel anwendet. Doch ist immer eine gewisse

[1]) Nouveau Système de Musique théorique. Paris 1726. Préface.

ungestörte Konzentration der Aufmerksamkeit nötig, um die Analyse der Klänge durch das Ohr allein auszuführen, und es ist deshalb ohne Hilfe der Resonanzröhren doch nicht möglich, mit dem Ohr allein eine genaue Vergleichung verschiedener Klangfarben zu vollenden, namentlich nicht in Beziehung auf die schwächeren Obertöne. Wenigstens muß ich gestehen, daß meine eigenen Versuche, die Obertöne der menschlichen Stimme aufzusuchen und ihre Unterschiede für die verschiedenen Vokale festzustellen, ziemlich ungenügend geblieben sind, bis ich die Resonatoren zu Hilfe nahm.

Wir gehen jetzt dazu über, zu beweisen, daß das menschliche Ohr die Klänge wirklich nach dem Gesetz der einfachen Schwingungen zerlegt. Da die Stärke der Empfindung verschiedener Töne nicht genau genug verglichen werden kann, müssen wir uns darauf beschränken, nachzuweisen, daß, wenn bei der Zerlegung der Klangmasse in einfache Schwingungen, wie sie durch die theoretische Berechnung oder das Mittönen zustande gebracht wird, einzelne Obertöne fehlen, das Ohr solche Obertöne ebenfalls nicht wahrnimmt.

Am geeignetsten für diese Beweisführung sind wieder die Klänge der Saiten, weil sie, je nach der Art der Erregung und der Stelle, welche erregt wird, mannigfache Abänderungen der Klangfarbe zulassen, und weil für diese Klänge auch die theoretische oder experimentelle Zerlegung am leichtesten und vollständigsten ausgeführt werden kann. Es hat zuerst Thomas Young[1]) nachgewiesen, daß, wenn man eine Saite zupft oder schlägt oder, wie wir hinzufügen können, streicht in einem solchen Punkt ihrer Länge, welcher Knotenpunkt irgend eines ihrer Flageolettöne ist, daß dann diejenigen einfachen Schwingungsformen der Saite, welche in dem angegriffenen Punkt einen Knoten haben, in der Gesamtbewegung der Saite nicht enthalten sind. Greifen wir also eine Saite gerade in der Mitte ihrer Länge an, so fehlen alle den geradzahligen Partialtönen entsprechenden einfachen Schwingungen, weil alle diese in der Mitte der Saite einen Knotenpunkt haben. Es gibt dies einen eigentümlich hohlen oder näselnden Klang der Saite. Greifen wir die Saite in $^1/_3$ ihrer Länge an, so fehlen die Schwingungen, die dem dritten, sechsten, neunten

[1]) London, Philosophical Transactions, 1800. T. I, p. 137.

Teilton entsprechen; greifen wir in $^1/_4$ ihrer Länge an, so fehlen die des vierten, achten, zwölften Teiltones usw.[1]).

Diese Folgerung der mathematischen Theorie läßt sich zunächst bestätigen, wenn wir den Saitenklang durch Mittönen analysieren, entweder durch Resonanzkugeln oder mittels anderer Saiten. Die Versuche lassen sich leicht am Klavier machen. Man drücke die beiden Tasten für *c* und *c'* herab, aber ohne den Hammer zum Anschlag zu bringen, so daß eben nur die beiden Saiten von ihrem Dämpfer befreit werden, und reiße eine der Saiten des Tones *c* mit dem Nagel, so daß sie tönt. Man wird, wenn man die Taste *c* fallen läßt, dann stets die Saiten des höheren *c'* nachklingen hören. Nur wenn man die Saite *c* gerade in ihrer Mitte reißt, da, wo man den Finger anlegen muß, um beim Anschlag des Hammers ihren ersten Flageoletton rein zu hören, nur dann wird die Saite *c'* nicht zum Mittönen gebracht.

Wenn man in $^1/_3$ oder $^2/_3$ der Länge der Saite *c* den Finger anlegt und die Taste anschlägt, hört man den Flageoletton *g'*; ist der Dämpfer von der Saite *g'* gehoben, so klingt diese nach. Reißt man nun die Saite *c* mit dem Nagel an derselben Stelle in $^1/_3$ oder $^2/_3$ ihrer Länge, so tönt das *g'* nicht nach; wohl aber, wenn man die Saite *c* an irgend einer anderen Stelle ihrer Länge mit dem Nagel reißt.

Ebenso erweist sich bei der Beobachtung mit Resonanzkugeln das *c'* in dem Klang der Saite *c* als fehlend, wenn man diese in ihrem Mittelpunkt gerissen hat, das *g'*, wenn man sie in $^1/_3$ oder $^2/_3$ ihrer Länge gerissen hat. Die Analyse des Saitenklanges durch mittönende Saiten oder Resonatoren bestätigt also durchaus die von Thomas Young aufgestellte Regel.

Für die Saitenschwingungen haben wir aber noch eine direktere Art der Analyse, als die durch Mittönen. Wenn wir nämlich eine schwingende Saite leise mit dem Finger oder einem Haarpinsel für einen Augenblick berühren, so dämpfen wir alle diejenigen einfachen Schwingungen, welche in dem berührten Punkt der Saite keinen Knotenpunkt haben. Diejenigen Schwingungen aber, welche dort einen Knotenpunkt haben, werden nicht gedämpft und bleiben allein

[1]) Siehe Beilage Nr. III.

bestehen. Ist also eine Saite in irgend welcher Weise zum Tönen gebracht worden, und will ich wissen, ob die der Duodezime des Grundtones entsprechende Bewegung der Saite unter den einfachen Schwingungen vorhanden ist, aus denen die Gesamtbewegung der Saite zusammengesetzt zu denken ist, so brauche ich nur einen der Knotenpunkte dieser Schwingungsform in $^1{}_3$ oder $^2{}_3$ der Saitenlänge zu berühren; sogleich werden alle anderen Töne schweigen und die Duodezime wird allein stehen bleiben, wenn sie vorhanden war. War sie aber nicht vorhanden und auch keiner ihrer Obertöne, weder der sechste, neunte, zwölfte usw. Flageoletton der Saite, so wird nach der Berührung des Fingers absolutes Schweigen eintreten.

Man drücke auf die Taste einer Saite des Klaviers, um sie von ihrem Dämpfer zu befreien. Man zupfe die Saite in ihrer Mitte und berühre unmittelbar darauf dieselbe Stelle mit dem Finger, so wird die Saite vollständig schweigen, ein Beweis davon, daß das Zupfen in der Mitte keinen der geradzahligen Partialtöne des Saitenklanges hervorgebracht hat. Man zupfe in $^1/_3$ und berühre unmittelbar nachher in $^1/_3$ oder $^2/_3$; die Saite wird wiederum schweigen, als Beweis, daß der dritte Partialton fehlte. Man zupfe an irgend einem anderen Punkt, als einem der genannten, so wird man den zweiten Partialton erhalten, wenn man die Saite in der Mitte berührt, den dritten, wenn man in $^1/_3$ oder $^2/_3$ ihrer Länge berührt.

Die Übereinstimmung dieser Art zu prüfen mit den Ergebnissen der Prüfung durch Mittönen ist zunächst wohl geeignet, auch experimentell den Satz festzustellen, den wir im vorigen Abschnitt nur durch die Ergebnisse der mathematischen Theorie gestützt hatten, daß nämlich das Mittönen eintrete oder nicht eintrete, je nachdem die entsprechenden einfachen Schwingungen in der zusammengesetzten Bewegung vorhanden seien oder nicht. Wir sind bei der letztbeschriebenen Art, einen Saitenton zu analysieren, ganz unabhängig von der Theorie des Mittönens, und die einfachen Schwingungen der Saiten sind eben durch ihre Knotenpunkte charakterisiert, durch diese erkennbar. Wenn beim Mittönen die Klänge zerlegt würden nach irgend welchen anderen Schwingungsformen als nach einfachen Schwingungen, so würde diese Übereinstimmung nicht stattfinden können.

Nachdem durch die beschriebenen experimentellen Prüfungen die Richtigkeit des von Thomas Young gefundenen Gesetzes festgestellt

ist, bleibt uns nur noch übrig, die Zerlegung der Saitenklänge durch das unbewaffnete Ohr vorzunehmen, um auch hier die völligste Übereinstimmung zu finden[1]). Sobald wir die Saite in einem ihrer Knotenpunkte zupfen oder anschlagen, fallen diejenigen Obertöne des Saitenklanges, denen der genannte Knotenpunkt angehört, auch für das Ohr fort, während sie gehört werden, wenn man die Saite an irgend einer anderen Stelle zupft. Zupft man also z. B. die Saite *c* in $^1/_3$ ihrer Länge, so hört man den Partialton *g'* nicht, zupft man sie nur wenig entfernt von dieser Stelle, so hört man ihn ganz deutlich. Das Ohr zerlegt also den Saitenklang genau in dieselben Bestandteile, wie er durch Mittönen zerlegt wird, also in einfache Töne nach Ohms Definition dieses Begriffes. Auch diese Versuche können übrigens dazu dienen, zu zeigen, daß es keine Täuschung der Phantasie ist, wenn man die Obertöne hört, wie Leute zuweilen glauben, welche sie zum erstenmal hören. Denn man hört sie eben nicht, wenn sie nicht da sind.

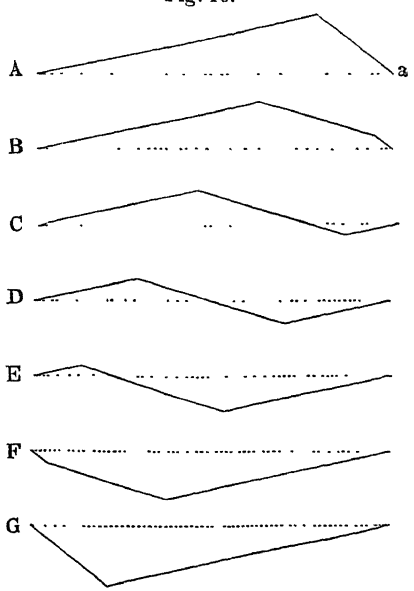
Es ist dies Verfahren sogar besonders gut geeignet, um die Obertöne der Saiten hörbar zu machen, namentlich bei folgender Abänderung desselben. Man schlage zuerst in rhythmischer Folge abwechselnd den dritten und vierten Ton der Saite allein an, indem man diese dabei in den betreffenden Knotenpunkten dämpft, und bitte den Hörer, sich die Art einfacher Melodie zu merken, welche dadurch entsteht. Dann schlage man die Saite ohne Dämpfung abwechselnd und in derselben rhythmischen Folge in diesen Knotenpunkten an, und erzeuge so dieselbe Melodie in den Obertönen; diese wird der Hörer jetzt leicht wiedererkennen. Natürlich muß man, um den dritten Ton zu haben, den Knotenpunkt des vierten anschlagen und umgekehrt.

Der Klang einer gezupften Saite ist übrigens noch merkwürdig als ein besonders auffallendes Beispiel, wie das Ohr eine Bewegung in eine lange Reihe von Partialtönen zerlegt, welche das Auge und die Vorstellung in viel einfacherer Weise aufzufassen vermögen. Eine Saite, welche durch einen spitzen Stift, oder mit dem Fingernagel zur Seite gezogen ist, hat, ehe sie losgelassen wird, die Form von Fig. 18*A*. Sie geht dann durch die Reihe der Formen, Fig. 18*B*,

[1]) S. Brandt in Poggendorffs Annalen der Physik **112**, 324, wo diese Tatsache nachgewiesen ist.

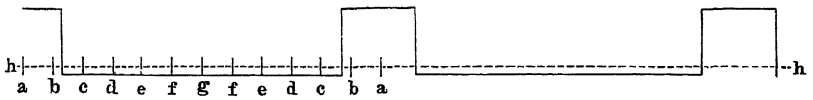
C, D, E, F über in die Form *G*, die Umkehrung von *A*, und dann ebenso wieder zurück. So schwankt sie hin und her zwischen den Formen *A* und *G*. Alle diese Formen sind, wie man sieht, aus drei geraden Linien zusammengesetzt, und wollte man die Geschwindigkeit der einzelnen Saitenpunkte durch Schwingungskurven ausdrücken, so würden diese ähnlich ausfallen. Unmittelbar überträgt nun die Saite kaum einen merklichen Teil ihrer Bewegung an die Luft; denn eine Saite, deren Enden auf zwei ganz unbeweglichen Unterlagen ruhen, z. B. auf metallenen Stegen, die an der Mauer des Zimmers befestigt sind, gibt kaum einen hörbaren Ton. Der Schall der Saite gelangt an die Luft vielmehr nur durch dasjenige ihrer Enden, welches mittels eines Steges auf einen nachgiebigen Resonanzboden gestützt ist. Der Klang der Saite hängt also auch wesentlich nur von der Bewegung dieses Endes ab, bzw. von dem Drucke, den es auf den Resonanzboden ausübt. Wie die Größe dieses Druckes mit der Zeit periodisch wechselt, ist in Fig. 19 dargestellt. Die Linie *hh* soll der Höhe des Druckes entsprechen, welchen das Ende *a* der Saite, während sie ruht, auf den Steg ausübt. Längs *hh* denke man sich Längen abgetragen, die der fortlaufenden Zeit entsprechen, die vertikalen Höhen der gebrochenen Linie über oder unter *hh* stellen die den betreffenden Zeitpunkten entsprechenden Erhöhungen und Verminderungen des Druckes dar. Der Druck der Saite gegen den Resonanzboden wechselt also, wie die Figur es darstellt, zwischen einem höheren und einem niederen Werte. Eine Zeit lang herrscht der höhere Druck, ohne sich zu ändern, dann tritt plötzlich der niedere ein, der dann ebenfalls eine gewisse Zeit lang unverändert anhält. Die Buchstaben *a* bis *g*, Fig. 19, entsprechen den Zeitpunkten der Saitenformen *A* bis *G*, Fig. 18. Dieser Wechsel zwischen einem

Fig. 18.



höheren Druckgrade und einem niederen ist es, welcher den Schall in der Luftmasse hervorbringt. Man muß sich billig wundern, daß eine Bewegung, die durch ein so einfaches und leicht aufzufassendes Verhältnis erzeugt wird, vom Ohr in eine so komplizierte Summe von Partialtönen zerlegt wird. Für das Auge und den Begriff ist die Wirkung der Saite auf den Resonanzboden so außerordentlich einfach darzustellen. Was hat die einfache gebrochene Linie der Fig. 19 zu tun mit Wellenlinien, welche in der Ausdehnung einer ihrer Perioden 3, 4, 5 bis 16 und mehr Wellenberge und Täler zeigen?

Fig. 19.



Es ist dies eines der schlagendsten Beispiele, wie verschieden Auge und Ohr eine periodische Bewegung auffassen.

Es gibt weiter keinen tönenden Körper, dessen Bewegungen unter abgeänderten Umständen wir so vollständig theoretisch berechnen und mit der Wirklichkeit vergleichen könnten, wie dies bei den Saiten der Fall ist. Beispiele, in denen sich die Theorie noch mit der Zerlegung durch das Ohr vergleichen läßt, sind folgende:

Ich habe eine Methode aufgefunden, durch welche es möglich ist, einfache pendelartige Schwingungen in der Luft zu erzeugen. Eine angeschlagene Stimmgabel gibt keine harmonischen Obertöne, oder höchstens dann Spuren davon, wenn sie in so übermäßig starke Schwingungen versetzt ist, daß die Schwingung nicht mehr ganz genau nach dem Gesetz des Pendels vor sich geht. Dagegen geben die Stimmgabeln sehr hohe unharmonische Nebentöne, die das eigentümliche helle Klingen der Gabel im Augenblick des Anschlagens hervorbringen, und nachher bei den meisten Gabeln schnell erlöschen. Hält man die tönende Gabel zwischen den Fingern, so geht sehr wenig von ihrem Ton an die Luft über, nur dicht vor das Ohr gebracht hört man ihn. Statt sie in den Fingern zu halten, kann man sie auch in ein festes dickes Brettchen einschrauben, auf dessen untere Seite man als Polster einige Stücke von Kautschukröhren geklebt hat. Stellt man ein solches Brettchen auf einen Tisch, so leiten die Kautschukröhren, auf denen es steht, den Schall nicht

an die Tischplatte über, und man hört von dem Ton der Stimmgabel so gut wie nichts. Nähert man nun den Zinken der Gabel eine Resonanzröhre[1]) von flaschenförmiger Gestalt, deren Luftmasse angeblasen denselben Ton gibt wie die Gabel, so gerät die Luft der Resonanzröhre in Mitschwingen, und der Ton der Gabel wird dadurch in großer Stärke auch an die äußere Luft übertragen. Nun sind die höheren Nebentöne der Resonanzröhren ebenfalls unharmonisch zum Grundton, und in der Regel werden die Nebentöne der Röhre weder den harmonischen noch den unharmonischen Nebentönen der Gabeln entsprechen, was sich übrigens auch in jedem einzelnen Falle genau kontrollieren läßt, wenn man die Nebentöne der Röhren durch stärkeres Anblasen und die der Stimmgabeln mit Hilfe mitschwingender Saiten, wie gleich beschrieben werden soll aufsucht. Wenn nun von den Tönen der Gabel nur ein einziger nämlich der Grundton, einem Ton der Röhre entspricht, so wird auch nur dieser durch Mitschwingung verstärkt, und nur dieser wird zur Luftmasse und zum Ohr des Beobachters geleitet. Die Untersuchung der Luftbewegung durch die Resonatoren zeigt in diesem Fall, daß wirklich bei nicht allzu starker Bewegung der Gabel jeder andere Ton neben dem Grundton fehlt, und auch das unbewaffnete Ohr hört in solchem Fall nur einen einzigen Ton, nämlich den gemeinsamen Grundton der Stimmgabel und Röhre ohne begleitende Obertöne.

Noch in anderer Weise kann man den Ton einer Stimmgabel von Nebentönen reinigen, indem man sie nämlich mit ihrem Stiele auf eine Saite aufsetzt und sie dem Stege der Saite so weit nähert daß einer der eigenen Töne des Saitenstückes, welches zwischen der Gabel und dem Stege abgegrenzt ist, dem Stimmgabelton gleich wird. Dann gerät die Saite kräftig in Schwingung und leitet den Ton der Stimmgabel in großer Stärke an ihren Resonanzboden und zur Luft, während man den Ton nur ganz schwach oder gar nicht hört, solange das genannte Saitenstück nicht im Einklang ist mit dem Ton der Gabel. Auf diese Weise kann man leicht die Saitenlängen finden, welche dem Grundton und den Obertönen der Stimm

[1]) Entweder eine Flasche von passender Größe, die man durch Eingießen von Wasser oder Öl leicht genauer stimmen kann, oder eine Röhre von Pappe, die an einem Ende ganz verschlossen ist, am anderen eine kleine runde Öffnung behält. Siehe Maße solcher Resonanzröhren in Beilage IV.

gabel entsprechen, und so die Tonhöhe, namentlich der letzteren, genau bestimmen. Führt man diesen Versuch mit gewöhnlichen, in ihrer ganzen Länge gleichartigen Saiten aus, so hält man wohl die unharmonischen Nebentöne der Stimmgabel vom Ohr ab, aber nicht die zuweilen schwach vorhandenen harmonischen, welche bei starker Schwingung der Gabeln hörbar werden können. Will man daher diesen Versuch ausführen, um reine pendelartige Schwingungen der Luft zu erzeugen, so ist es vorteilhafter, einen Punkt der Saite etwas zu belasten, wenn auch nur durch ein angeschmolzenes Tröpfchen Siegellack. Dadurch werden die höheren Töne der Saite selbst unharmonisch zum Grundton, und es trennen sich auf der Saite die Punkte, wo man die Stimmgabel aufsetzen muß, um entweder ihren Grundton oder dessen höhere Oktave (wenn sie vorhanden ist) hörbar zu machen.

In den meisten anderen Fällen ist die mathematische Analyse der Schallbewegungen noch nicht so weit fortgeschritten, daß wir mit Sicherheit angeben könnten, welche Obertöne und wie stark sie da sein müssen. Bei den Kreisplatten und gespannten Membranen, welche angeschlagen sind, würde es theoretisch gehen, aber deren unharmonische Nebentöne sind so zahlreich und liegen so nahe aneinander, daß die meisten Beobachter an der Aufgabe, sie zu trennen, wohl scheitern möchten. Bei den elastischen Stäben dagegen liegen die Töne weit auseinander, sind unharmonisch und deshalb leicht einzeln mit dem Ohr zu erkennen. Die Töne eines an beiden Enden freien Stabes sind, wenn wir die Schwingungszahl des Grundtones mit 1 bezeichnen, und diesen Ton selbst mit c:

	Schwingungszahl	Notenbezeichnung
Erster Ton	1,0000	c
Zweiter Ton	2,7576	$fis' - 0{,}2$
Dritter Ton	5,4041	$f'' + 0{,}1$
Vierter Ton	13,3444	$a''' - 0{,}1$

Die Notenbezeichnung ist nach der gleichschwebenden Temperatur berechnet und die dazu gesetzten Brüche bedeuten Teile eines ganzen Tones.

Wo wir die theoretische Analyse der Bewegung nun auch nicht ausführen können, können wir doch immer mittels der Resonatoren

und anderer mitschwingender Körper jeden einzelnen wahrgenommenen Klang zerlegen, und diese Zerlegung, welche durch die Gesetze des Mittönens bestimmt ist, vergleichen mit der des unbewaffneten Ohres. Das letztere ist natürlich viel weniger empfindlich, als das mit dem Resonator bewaffnete, und es ist häufig nicht möglich, Töne, die der Resonator schwach angibt, zwischen anderen stärkeren ohne Resonator zu erkennen. Dagegen findet, soweit meine Erfahrungen reichen, insofern vollständige Übereinstimmung statt, als das Ohr alle von den Resonatoren stark angegebenen Töne auch ohne sie wahrnimmt, und dagegen keinen Oberton empfindet, den der Resonator gar nicht angibt. Ich habe in dieser Beziehung namentlich mit menschlichen Stimmen und mit dem Harmonium viele Versuche angestellt, die alle die angegebene Regel bestätigen.

Durch die angegebenen Erfahrungen wird nun der von G. S. Ohm aufgestellte und verteidigte Satz als richtig erwiesen, daß das menschliche Ohr nur eine pendelartige Schwingung der Luft als einen einfachen Ton empfindet, und jede andere periodische Luftbewegung zerlegt in eine Reihe von pendelartigen Schwingungen, und die diesen entsprechende Reihe von Tönen empfindet.

Wenn wir also unserer früher gegebenen Definition gemäß die Empfindung, welche eine periodische Luftbewegung im Ohr erregt, mit dem Namen eines Klanges belegen, die Empfindung, welche eine einfache pendelartige Luftbewegung erregt, mit dem Namen eines Tones, so ist der Regel nach die Empfindung eines Klanges aus der Empfindung mehrerer Töne zusammengesetzt. Insbesondere werden wir nun als Klang bezeichnen den Schall, den ein einzelner tönender Körper hervorbringt, während der Schall, welcher von mehreren gleichzeitig erklingenden Instrumenten hervorgebracht wird, als Zusammenklang zu bezeichnen ist. Wenn also eine einzelne Note auf einem musikalischen Instrument angegeben wird, sei es auf einer Violine, Trompete, Orgel oder von einer Singstimme, so ist sie in genauer Sprechweise als ein Klang der genannten Tonwerkzeuge zu bezeichnen. Die bisherige Ausdrucksweise, eine solche Note als einen Ton jener Instrumente zu bezeichnen, würde nur zulässig sein, wo man von der Zusammensetzung des Klanges absehen kann, und nur seinen Grundton berücksichtigen will. In der Tat ist

meistenteils der Grundton stärker als die Obertöne, und man beurteilt nach ihm allein deshalb auch in der Regel die Tonhöhe des Klanges. Wirklich auf einen Ton reduziert sich der Klang einer Tonquelle nur in sehr wenigen Fällen, z. B. bei den Stimmgabeln, deren Ton durch eine Resonanzröhre in der beschriebenen Weise an die Luft übertragen wird, und außerdem ist der Klang weiter gedackter und schwach angeblasener Orgelpfeifen fast frei von Obertönen und nur von Luftgeräusch begleitet.

Es ist bekannt, daß diese Verbindung mehrerer Töne zu einem Klang, welche von der Natur in den Klängen der meisten musikalischen Instrumente hervorgebracht ist, auf den Orgeln auch künstlich durch besondere mechanische Vorrichtungen nachgeahmt wird. Die Klänge der Orgelpfeifen sind verhältnismäßig arm an Obertönen; wo es darauf ankommt, ein Register von scharf durchdringender Klangfarbe und großer Gewalt der Tonstärke herzustellen, genügen die weiten Pfeifen (Prinzipalregister und Weitgedackt) nicht, weil ihr Ton zu mild, zu arm an Obertönen ist, die engen (Geigenregister und Quintaten) nicht, weil ihr Ton zwar schärfer, aber auch schwächer ist. Für solche Gelegenheiten, namentlich um den Gesang der Gemeinde zu begleiten, dienen nun die Mixturregister. In diesen Registern ist jede Taste mit einer größeren oder kleineren Reihe von Pfeifen verbunden, die sie gleichzeitig öffnet, und welche den Grundton und eine gewisse Anzahl der ersten Obertöne des Klanges der betreffenden Note geben. Sehr gewöhnlich ist es, die höhere Oktave mit dem Grundton zu verbinden, demnächst die Duodezime. Die zusammengesetzteren Mixturen (Kornett) geben die ersten sechs Partialtöne, also außer den ersten beiden Oktaven des Grundtones und der Duodezime auch noch die höhere Terz und die Oktave der Duodezime. Es ist dies die Reihe der Obertöne, soweit sie den Tönen des Durakkords angehören. Damit aber diese Mixturregister nicht unerträglich schreiend werden, ist es nötig, daß die tieferen Töne jeder Note noch durch andere Pfeifenreihen verstärkt werden. Denn in allen natürlichen und musikalisch brauchbaren Klängen nehmen die Teiltöne nach der Höhe hin an Stärke ab. Dies muß bei ihrer Nachahmung mittels der Mixturen berücksichtigt werden. Die Mixturen waren der bisherigen musikalischen Theorie, welche nur von den Grundtönen der Klänge etwas weiß, ein Greuel, doch

zwang die Praxis der Orgelspieler und Orgelbauer sie beizubehalten, und zweckmäßig eingerichtet und richtig angewendet sind sie ein höchst wirksames musikalisches Hilfsmittel. Dabei ist ihre Anwendung durch die Natur der Sache vollkommen gerechtfertigt. Der Musiker muß sich alle Klänge aller musikalischen Instrumente ähnlich wie die eines Mixturregisters zusammengesetzt denken, und welche wesentliche Rolle diese Zusammensetzung auf die Konstruktion unserer Tonleitern und Akkorde hat, wird in den späteren Abteilungen dieses Buches klar werden.

Wir sind mit unserer Untersuchung hier zu einer Schätzung der Obertöne gelangt, welche von den bisherigen Ansichten der Musiker und auch wohl der Physiker ziemlich abweicht, und müssen deshalb widersprechenden Ansichten entgegentreten. Man hat die Obertöne wohl gekannt, aber fast nur in einzelnen Klangarten, namentlich denen der Saiten, wo die Gelegenheit günstig war, sie zu beobachten; sie erscheinen aber in den bisherigen physikalischen und musikalischen Werken als ein vereinzeltes, zufälliges Phänomen von geringer Intensität, eine Art von Kuriosum, welches man wohl gelegentlich anführte, um dadurch die Meinung einigermaßen zu stützen, daß die Natur schon die Konstruktion unseres Durakkords vorgebildet habe, welches im ganzen aber doch ziemlich unbeachtet blieb. Dem gegenüber müssen wir behaupten, und werden es im nächsten Abschnitt nachweisen, daß die Obertöne ein allgemeiner Bestandteil fast aller Klänge sind mit wenigen schon genannten Ausnahmen, und daß ein gewisser Reichtum derselben ein wesentliches Erfordernis einer guten musikalischen Klangfarbe ist. Endlich hat man sie fälschlich für schwach gehalten, weil sie schwer zu beobachten sind, während im Gegenteil in einigen der besten musikalischen Klangfarben die Stärke der unteren Obertöne der des Grundtones nicht viel nachgibt.

Von der letzteren Tatsache kann man sich wiederum an Saitenklängen leicht durch den Versuch überzeugen. Wenn man eine Saite eines Klaviers oder Monochords anschlägt, und unmittelbar nachher einen ihrer Knotenpunkte für einen Augenblick leicht mit dem Finger berührt, so bleibt der entsprechende Teilton, dessen Knotenpunkt berührt wurde, in unveränderter Stärke stehen, die übrigen Töne erlöschen. Man kann ebensogut auch gleich während des Anschlages den Finger auf dem Knotenpunkt ruhen lassen und

erhält dann von vornherein nur den betreffenden Teilton statt des ganzen Klanges der Note. Auf beiderlei Wegen kann man sich überzeugen, daß die ersten Obertöne, also namentlich die Oktave und Duodezime, keineswegs schwache und schwer zu hörende Töne sind, sondern eine sehr namhafte Stärke haben. In einigen Fällen lassen sich auch Zahlenwerte für die Stärke der Obertöne geben, wie der nächste Abschnitt zeigen wird. Für andere als Saitentöne ist der Nachweis nicht so leicht zu führen, weil man die Obertöne nicht isoliert ansprechen lassen kann; doch kann man dann immer noch mittels der Resonatoren erkennen, wie stark die Obertöne etwa sind, indem man die ihnen entsprechende Note auf demselben oder einem anderen Instrument so stark angibt, daß sie dieselbe Stärke der Resonanz im Resonator hervorbringt.

Die Schwierigkeit, sie zu hören, ist kein Grund, sie für schwach zu halten; denn diese Schwierigkeit hängt gar nicht von ihrer Stärke, sondern von ganz anderen Umständen ab, welche erst durch die neueren Fortschritte der Physiologie der Sinnesorgane in das rechte Licht gestellt worden sind. An diese Schwierigkeit, die Obertöne wahrzunehmen, haben sich Einwürfe geknüpft, welche A. Seebeck[1]) gegen das von Ohm aufgestellte Gesetz der Klanganalyse vorgebracht hat; und vielleicht möchten viele meiner Leser, die nicht mit der Physiologie der anderen Sinnesorgane, namentlich des Auges, bekannt sind, geneigt sein, sich Seebecks Meinungen anzuschließen. Ich muß deshalb hier auf diesen Streit und die Eigentümlichkeiten unserer sinnlichen Wahrnehmungen, von denen seine Entscheidung abhängt, näher eingehen.

Seebeck, obgleich ein in akustischen Versuchen und Beobachtungen ausgezeichnet gewandter Forscher, war nicht immer imstande gewesen, die Obertöne da zu erkennen, wo sie dem von Ohm aufgestellten Gesetz gemäß hätten vorhanden sein müssen. Aber, wie wir gleich hinzufügen müssen, er hat auch nicht die von uns vorher aufgeführten Methoden angewendet, um sein Ohr auf die fraglichen Obertöne hinzuleiten. Oder wenn er die Obertöne auch hörte, so erschienen sie ihm doch zu schwach, verglichen mit der Stärke, die sie theoretisch haben sollten. Er schloß daraus, daß die von Ohm

[1]) In Pogg. Ann. d. Phys. 60, 449; 63, 353 u. 368; Ohm, ebend. 59 513; 62, 1.

aufgestellte Definition des einfachen Tones zu eng sei, daß nicht bloß pendelartige Schwingungen, sondern auch anders gestaltete, wenn ihre Form sich nur nicht allzuweit von der der pendelartigen Schwingungen unterscheide, imstande seien, im Ohr die Empfindung eines einzelnen Tones, aber von wechselnder Klangfarbe, hervorzurufen. Er behauptete deshalb, daß, wenn ein Klang aus mehreren einfachen Tönen zusammengesetzt sei, ein Teil der Tonstärke der Obertöne mit dem Grundton verschmolzen werde und diesen verstärke, während höchstens ein kleiner Rest noch die Empfindung eines Obertones hervorbringe. Ein bestimmtes Gesetz darüber, welche Schwingungsformen den Eindruck eines einzelnen Tones, welche den eines zusammengesetzten geben müßten, hat er nicht aufgestellt. Die Versuche von Seebeck, auf welche er seine Behauptungen stützt, brauchen wir hier nicht näher zu beschreiben. Sie haben nur zum Zweck, Klänge herzustellen, in denen man die Stärke der einfachen Schwingungen, die den Obertönen entsprechen, entweder theoretisch berechnen kann, oder deren Obertöne man isoliert hörbar machen kann. Für den letzteren Zweck ist namentlich die Sirene benutzt worden; wir haben eben beschrieben, wie man dasselbe mittels der Saiten erreichen kann. Seebeck weist in den einzelnen Fällen nach, daß die einfachen Schwingungen, die den Obertönen entsprechen, eine namhafte Stärke haben, während doch die Obertöne in dem zusammengesetzten Klang gar nicht oder schwer zu hören seien. Diese Tatsache haben wir selbst im Laufe dieses Abschnittes schon angeführt: sie kann für den einen Beobachter vollständig richtig sein, namentlich wenn er nicht die richtigen Mittel für die Beobachtung der Obertöne anwendet, während ein anderer, oder auch jener erste selbst bei besserer Unterstützung, die Obertöne vollkommen gut hört.

Es gibt nun mancherlei Hilfsmittel, durch welche wir unterstützt werden in dem Geschäft, die Klänge verschiedener Tonquellen voneinander zu sondern, dagegen die Partialtöne derselben Tonquelle zusammen zu halten. Wenn zu einem schon bestehenden Klang ein zweiter später hinzukommt, dann der zweite bestehen bleibt, während der erste aufhört, ist die Trennung schon durch die Zeitfolge erleichtert. Wir haben den ersten Klang einzeln kennen gelernt und wissen deshalb gleich, was wir von dem eintretenden Zusammenklang auf Rechnung des ersten Klanges abzuziehen haben. Aber auch selbst,

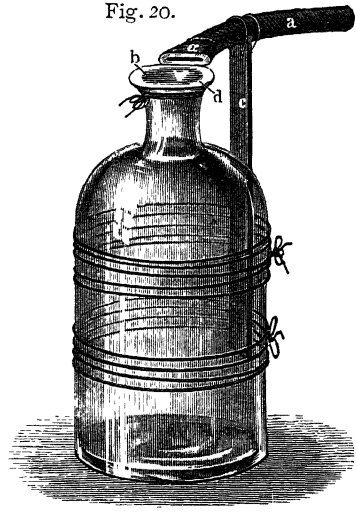
wenn in vielstimmiger Musik mehrere Stimmen sich in gleichem Rhythmus fortbewegen, ist die Ansatzweise der Klänge bei den verschiedenen Instrumenten und Stimmen, die Art ihrer Schwellung, die Sicherheit ihres Aushaltens, die Art, wie sie abklingen, meist ein wenig verschieden. Die Töne der Klaviere z. B. setzen plötzlich mit einem Schlage ein, sind also im ersten Augenblick am stärksten und nehmen dann schnell ab; die Töne der Blechinstrumente dagegen setzen schwerfällig ein, sie brauchen eine kleine merkliche Zeit, um in voller Stärke sich zu entwickeln; die Klänge der Streichinstrumente zeichnen sich aus durch ihre außerordentlich große Beweglichkeit, aber wenn die Spielart oder das Instrument nicht sehr vollendet sind, so sind sie durch kleine, sehr kurze Pausen unterbrochen, die im Ohr das Gefühl des Kratzens hervorbringen, wie wir später bei der Analyse des Violinklanges noch näher beschreiben werden. Wenn dergleichen Instrumente also auch zusammengehen, so gibt es meist Zeiten, wo ein oder der andere Klang das Übergewicht hat, und deshalb vom Ohr leicht ausgesondert wird. Übrigens wird in guten vielstimmigen Kompositionen auch durchaus darauf Rücksicht genommen, dem Ohr die Trennung der Klänge zu erleichtern. In der eigentlich polyphonen Musik, wo jede einzelne Stimme ihre selbständige Melodieführung hat, ist ein Hauptmittel, um den Gang der Stimmen klar zu erhalten, stets gewesen, daß man sie in verschiedenem Rhythmus und auf verschiedenen Taktteilen sich nebeneinander fortbewegen läßt; und wo dies gar nicht oder nur in beschränkter Weise angeht, wie in den vierstimmig ausgesetzten Chorälen, ist es deshalb die alte Regel, womöglich drei Stimmen sich nur um eine Tonstufe fortbewegen zu lassen, während die vierte über mehrere wegspringt. Der geringe Wechsel in der Tonhöhe macht es dann dem Hörer leichter, die Identität der einzelnen Stimmen festzuhalten.

Bei der Zerlegung der Klänge in Teiltöne fällt dieses Hilfsmittel weg; wenn ein Klang einsetzt, setzen alle seine Teiltöne in gleicher Stärke ein, wenn der schwillt, schwellen sie meistens alle gleichmäßig, wenn er aufhört, hören alle zusammen auf. Es ist deshalb die Gelegenheit, diese Töne vereinzelt und selbständig zu hören, meist abgeschnitten. Ganz ähnlich, wie die natürlich zusammengehörigen Partialtöne einer einzelnen Tonquelle, verschmelzen nun auch die Partialtöne in einem Mixturregister der Orgel, welche alle mit der-

selben Taste angeschlagen werden und in gleicher Weise, wie ihr Grundton sich in der Melodie fortbewegen.

Ferner sind die Klänge der meisten Instrumente noch mit charakteristischen unregelmäßigen Geräuschen begleitet; ich erinnere an das Kratzen und Reiben des Violinbogens, das Sausen der Luft an Flöten und Orgelpfeifen, das Schnarren der Zungenwerke usw. Diese Geräusche erleichtern es ebenfalls sehr, die Klänge der einzelnen Instrumente, die wir als mit ihnen verbunden schon kennen, einzeln aus einer Klangmasse auszuscheiden. Den Teiltönen eines Klanges fehlt natürlich dieses Erkennungszeichen.

Fig. 20.



Wir dürfen uns daher nicht wundern, wenn die Auflösung der Klänge in Teiltöne für unser Ohr nicht ganz so leicht ist, als die Auflösung eines Zusammenklanges vieler Instrumente in seine nächsten Bestandteile, und daß selbst ein geübtes musikalisches Ohr einen ziemlich hohen Grad von Aufmerksamkeit anwenden muß, wenn es der erstgenannten Aufgabe sich unterzieht.

Auch ist leicht einzusehen, daß die genannten Unterstützungsmittel zu einer richtigen Trennung verschiedener Klänge voneinander nicht immer ausreichen werden, daß namentlich bei gleichmäßig anhaltenden Klängen, deren einer als ein Oberton des anderen betrachtet werden kann, das Urteil schwankend werden mag. Und in der Tat ist es so. Ein sehr belehrender Versuch ist darüber von G. S. Ohm angestellt worden, und zwar mit Klängen einer Violine. Viel zweckmäßiger ist, diesen Versuch mit einfachen Tönen, z. B. denen einer gedackten Orgelpfeife, auszuführen. Am besten eignen sich dazu angeblasene Glasflaschen von der in Fig. 20 dargestellten Form, die man sich leicht herstellen und dem Versuch anpassen kann. An der Flasche ist mittels des Stäbchens *c* ein Rohr *a* von Guttapercha in passender Lage befestigt. Die der Flasche zugekehrte Mündung des Rohres ist vorher in warmem Wasser erweicht und platt gedrückt worden, so daß sie einen schmalen Spalt darstellt, aus welchem die

Luft über die Mündung der Flasche hinströmt. Wird das Rohr durch einen Gummischlauch mit einem Blasebalg verbunden und die Flasche angeblasen, so gibt sie einen dumpfen, dem Vokal *U* ähnlichen Ton, welcher noch freier von Obertönen als der Ton einer gedackten Pfeife ist, nur von wenig Luftgeräusch begleitet. Die Tonhöhe, finde ich, ist bei kleinen Änderungen der Windstärke leichter konstant zu halten als bei den gedackten Pfeifen. Man macht solche Flaschen tiefer, wenn man ihre Mündung durch eine aufgelegte kleine Holzplatte zum Teil deckt, man macht sie höher, wenn man Öl oder geschmolzenes Wachs hineingießt und kann dadurch leicht kleine Änderungen ihrer Stimmung, wie man sie wünscht, hervorbringen. Ich hatte eine größere auf *b*, eine kleinere auf *b'* gestimmt, und verband sie beide mit demselben Blasebalg, so daß beim Gebrauch des Balges beide zugleich ansprachen. Beide in dieser Weise verbunden, gaben einen Klang von der Tonhöhe *b* der tieferen unter ihnen, aber von der Klangfarbe des Vokals *O*. Wenn ich dann bald den einen, bald den anderen Kautschukschlauch zudrückte, so daß ich nacheinander die beiden Töne einzeln hörte, war ich imstande, sie auch in ihrer Vereinigung wohl noch einzeln zu erkennen, aber nicht für lange Zeit; allmählich verschmolz wieder der höhere mit dem tieferen. Diese Verschmelzung tritt sogar ein, wenn der höhere Ton etwas stärker als der tiefere ist. Bei dieser allmählich eintretenden Verschmelzung ist nun die Änderung der Klangfarbe charakteristisch. Wenn man erst den hohen Ton angegeben hat, dann den tieferen hinzukommen läßt, hört man anfangs, wie ich finde, den höheren Ton noch in seiner ganzen Stärke weiter; daneben klingt der tiefe in seiner natürlichen Klangfarbe wie ein *U*. Allmählich aber, wie sich die Erinnerung des isoliert gehörten höheren Tones verliert, wird jener immer undeutlicher und dabei auch schwächer, während der tiefe Ton scheinbar stärker wird und wie *O* lautet. Diese Schwächung des hohen und Verstärkung des tiefen Tones hat Ohm auch an der Violine beobachtet; sie tritt freilich, wie Seebeck bemerkt, nicht immer ein, wahrscheinlich je nachdem die Erinnerung an die einzeln gehörten Töne mehr oder weniger lebendig ist und beide Töne mehr oder weniger gleichmäßig nebeneinander hinklingen. Wo der Versuch aber gelingt, gibt er den besten Beweis dafür ab, daß es sich hier ganz wesentlich um die verschiedene Tätigkeit der

Aufmerksamkeit handelt. Bei den Flaschentönen ist außer der Verstärkung des unteren Tones auch die Änderung seiner Klangfarbe sehr deutlich und bezeichnend für das Wesen des Vorganges; bei den scharfen Violinklängen ist sie weniger auffallend.

Diesen Versuch nahmen sowohl Ohm wie Seebeck für ihre Meinung in Anspruch. Wenn Ohm es für eine Gehörtäuschung erklärt, daß das Ohr die Obertöne ganz oder zum Teil als Verstärkung des Grundtones (oder vielmehr des Klanges, dessen Höhe durch die des Grundtones bestimmt wird) auffaßt, so hat er hier freilich einen nicht ganz richtigen Ausdruck gebraucht, obgleich er richtiges meinte, und Seebeck konnte ihm mit Recht erwidern, daß das Ohr der einzige Richter in Sachen der Gehörempfindungen sein müsse, und man die Art, wie das Ohr Töne auffasse, nicht als Täuschung bezeichnen dürfe. Indessen zeigen doch die von uns beschriebenen Versuche, daß das Ohr sich hier verschieden verhält, je nach der Lebhaftigkeit der Erinnerung an die einzelnen zum Ganzen verschmolzenen Gehöreindrücke und je nach der Spannung der Aufmerksamkeit. Wir können also allerdings von den Empfindungen des unbefangen auf die Außendinge gerichteten Ohres, dessen Interessen Seebeck vertritt, appellieren an das sich selbst aufmerksam beobachtende und in seinen Beobachtungen zweckmäßig unterstützte Ohr, welches in der Tat so verfährt, wie das von Ohm aufgestellte Gesetz es vorschreibt.

Auch ein anderer Versuch ist hier noch anzuführen. Wenn man den Dämpfer eines Klaviers hebt, so daß alle Saiten frei schwingen können, und nun gegen den Resonanzboden des Instrumentes den Vokal *A* auf irgend eine der Noten des Klaviers kräftig singt, so gibt die Resonanz der nachklingenden Saiten deutlich *A*, singt man *O*, so klingt *O* nach, singt man *E*, so klingt *E* nach; *I* weniger gut. Der Versuch gelingt nicht so gut, wenn man den Dämpfer nur von der Saite entfernt, deren Ton man singt. Der Vokalcharakter in dem Nachhall entsteht dadurch, daß dieselben Obertöne nachklingen, welche für die Vokale charakteristisch sind. Diese klingen aber besser und deutlicher nach, wenn die ihnen entsprechenden höheren Saiten frei sind und mitklingen können. Also auch hier wird schließlich der Klang der Resonanz zusammengesetzt aus den Tönen mehrerer Saiten, und viele einzelne Töne kombinieren sich zu einem Klang von besonderer Klangfarbe. Außer den Vokalen der menschlichen Stimme

ahmt das Klavier auch den Klang einer Klarinette ganz deutlich nach, wenn man mit einer solchen stark hineinbläst.

Zu bemerken ist übrigens, daß, wenn auch die Höhe eines Klanges für seinen musikalischen Gebrauch nach dem Grundton bestimmt wird, doch in Wirklichkeit der Einfluß der Obertöne dabei nicht verloren geht. Sie geben dem Klang immer etwas Helleres und Höheres. Einfache Töne klingen dumpf. Wenn man sie mit gleich hohen zusammengesetzten Klängen vergleicht, ist man geneigt, letztere in eine höhere Oktave zu verlegen als erstere. Es ist ein Unterschied derselben Art, als wenn man den Vokal *U* und dann *A* auf dieselbe Note singt. Übrigens wird eben deshalb die Vergleichung der Tonhöhe von Klängen verschiedener Klangfarbe oft recht schwer; man irrt sich nämlich leicht um eine Oktave, und es sind den berühmtesten Musikern und Akustikern dergleichen Irrtümer zugestoßen. So ist bekannt, daß der als Violinist und theoretischer Musiker berühmte Tartini die Kombinationstöne alle um eine Oktave zu hoch angegeben hat, während andererseits Henrici[1]) die Obertöne der Stimmgabeln um eine Oktave zu tief angibt.

Die dem Ohr bei der Unterscheidung der Obertöne zufallende Aufgabe ist eine solche, bei der es sich darum handelt, ein gegebenes Aggregat von Empfindungen in seine elementaren, nicht weiter zerlegbaren Bestandteile aufzulösen. Wir sind daran gewöhnt, in einer großen Anzahl von Fällen gleichzeitig bestehende Empfindungen verschiedener Art oder verschiedener Körperstellen unmittelbar bei der Wahrnehmung derselben als gesondert zu erkennen und unsere Aufmerksamkeit nach Willkür jeder einzelnen unter denselben gesondert zuwenden zu können. So können wir z. B. in jedem Augenblick uns dessen gesondert bewußt werden, was wir sehen, was wir hören, was wir fühlen, und dabei noch scheiden, was wir am Finger oder an der großen Zehe fühlen, ob Druck oder leise Berührung oder Wärme. Ebenso im Gesichtsfelde. Ja, wie ich im folgenden zu zeigen mich bemühen werde, trennen wir gerade in allen denjenigen Fällen unsere Empfindungen leicht voneinander, wo wir genau wissen, daß sie zusammengesetzt sind, wo wir nämlich durch häufig wiederholte, übereinstimmende Erfahrungen sicher geworden sind, daß die

[1]) Pogg. Ann. 99, 506. — Dieselbe Schwierigkeit erwähnt Zamminer als bekannt unter den Musikern. (Die Musik und die musikalischen Instrumente, S. 111.)

gegenwärtige Empfindung durch gleichzeitige Einwirkung mehrerer voneinander unabhängiger Erregungsmittel, von denen jedes einzeln genommen eine ebenso wohlbekannte Empfindung hervorzurufen pflegt, entstehe. Daher bildet sich uns zunächst die Meinung, daß nichts leichter sei, als in einer Anzahl gleichzeitig erregter verschiedener Empfindungen die einzelnen voneinander zu unterscheiden, und daß dies eine unmittelbar gegebene Fähigkeit unseres inneren Sinnes sei

So finden wir es denn unter anderem ganz selbstverständlich, daß wir verschiedene gleichzeitig vernommene Klänge einzeln hören und erwarten, daß wir in jedem Fall, wo zwei solche zusammenkommen, dasselbe müßten tun können.

Anders stellt sich die Sache, wenn man sich daran macht, auch die ungewöhnlicheren Fälle der Wahrnehmung zu untersuchen und die Bedingungen vollständiger kennen zu lernen, unter denen die besprochene Unterscheidung zustande kommt oder ausbleibt, wie dies in der Physiologie der Sinne geschieht. Dabei zeigt es sich denn, daß wir für das Bewußtwerden einer Empfindung zwei verschiedene Arten oder Grade unterscheiden müssen. Der niedere Grad des Bewußtwerdens ist derjenige, bei welchem der Einfluß der betreffenden Empfindung sich nur in der von uns gebildeten Vorstellung von den äußeren Dingen und Vorgängen geltend macht und diese bestimmen hilft. Dies kann geschehen, ohne daß wir uns dabei zur Erkenntnis zu bringen brauchen oder vermögen, welchem besonderen Teil unserer Empfindungen wir die Anschauung dieses oder jenes Verhältnisses in unseren Wahrnehmungen verdanken. Wir wollen in diesem Falle mit Leibniz den Ausdruck brauchen, daß der betreffende Empfindungseindruck perzipiert sei. Der zweite, höhere Grad des Bewußtwerdens ist der, wo wir die betreffende Empfindung unmittelbar als einen vorhandenen Teil der zurzeit in uns erregten Summe von Empfindungen unterscheiden. Eine solche Empfindung wollen wir als wahrgenommen (apperzipiert nach Leibniz) bezeichnen. Beides muß sorgfältig voneinander geschieden werden.

Seebeck und Ohm sind miteinander darüber einig, daß die harmonischen Obertöne der Klänge perzipiert werden. Denn als perzipiert erkennt Seebeck sie an, indem er zugibt, daß ihre Einwirkung auf das Ohr die Stärke oder Klangfarbe des betreffenden Schalles verändere. Der Streit dreht sich darum, ob sie auch in

allen Fällen in ihrer gesonderten Existenz wahrgenommen, apperzipiert werden können, ob also das Ohr auch ohne Unterstützung von Resonatoren oder anderen physikalischen Hilfsmitteln, welche die zu ihm gelangende Klangmasse selbst verändern, durch bloße passende Richtung und Spannung der Aufmerksamkeit unterscheiden könne, ob und wie stark in dem gegebenen Klang die Oktave oder Duodezime usw. vorhanden sei.

Ich will zunächst eine Reihe von Beispielen anführen, aus denen hervorgeht, daß die für die Auflösung der Klänge stattfindende Schwierigkeit auch im Gebiet anderer Sinne besteht. Beginnen wir mit den verhältnismäßig einfachen Wahrnehmungen des Geschmacksinnes. Die Ingredienzien unserer Speisen und die Gewürze, mit denen wir sie zu versetzen pflegen, sind gar nicht so sehr mannigfaltig, daß nicht jeder sie bald kennen lernen könnte. Und doch sind nur wenige Menschen, die nicht selbst die Kochkunst praktisch ausgeübt haben, imstande, schnell und richtig die Bestandteile der vorgesetzten Speisen durch den Geschmack zu ermitteln. Wieviel Übung und vielleicht auch besonderes Talent zur Kunst des Weinschmeckens gehört, um fremde Einmischungen zu entdecken, ist in allen Weinländern bekannt. Für den Geruch gilt ähnliches; ja selbst Geschmacks- und Geruchsempfindungen können sich zu einem Ganzen verbinden. Wir machen uns beim alltäglichen Gebrauch unserer Zunge durchaus nicht klar, daß das Eigentümliche von vielen Speisen und Getränken, z. B. Essig oder Wein, auch auf Geruchsempfindungen beruht, indem deren Dämpfe vom Schlund in den hinteren Teil der Nase eintreten. Erst Personen, denen der Geruchssinn fehlt, zeigen uns, eine wie wesentliche Rolle er auch beim Schmecken spielt, indem bei solchen auch die Beurteilung der Speisen vielfältig mangelhaft ist, wie es übrigens jeder an sich erfahren kann, während er einen starken Schnupfen bei reiner Zunge hat.

Wenn unsere Hand unversehens an einem kalten und glatten Metallstück entlang streift, glauben wir leicht, uns naß gemacht zu haben. Dies zeigt, daß die Tastempfindung des Nassen zusammengesetzt ist aus der des widerstandslosen Gleitens und der Kälte, welche in dem einen Falle das Metall wegen seiner guten Wärmeleitung, im anderen Falle das Wasser wegen seiner Verdunstungskälte und großen Wärmekapazität hervorbringt. Daß wir beides am Nassen wahrnehmen, können wir, wenn wir uns besinnen, wohl erkennen, daß

aber das eigentümliche Gefühl des Nassen in der Tat ganz aufgeht in diese beiden Empfindungen, lehrt uns erst die genannte Täuschung.

Die Erfindung des Stereoskops hat gelehrt, daß die Anschauung der Tiefendimension des Gesichtsfeldes, d. h. der verschiedenen Entfernung, in der die Objekte und ihre Teile sich vom Auge des Beschauers befinden, wesentlich beruht auf der gleichzeitigen Perzeption zweier etwas verschiedener perspektivischer Bilder derselben in den beiden Augen des Beobachters. Bei hinreichend großer Verschiedenheit der genannten beiden Bilder ist es auch nicht schwer, beide als getrennt wahrzunehmen. Wenn wir z. B. einen fernen Gegenstand fixieren und einen unserer Finger vorschieben, so sehen wir zwei Bilder des Fingers vor dem Hintergrunde erscheinen, deren eines fortfällt, wenn wir das rechte Auge schließen, während das andere dem linken angehört. Wenn aber die Unterschiede nach der Tiefe verhältnismäßig klein sind, und daher auch die Unterschiede der beiden perspektivischen Bilder auf unseren Netzhäuten gering ausfallen, so gehört große Übung und Sicherheit in der Beobachtung von Doppelbildern dazu, diese voneinander zu scheiden, während doch die Perzeption ihrer Unterschiede noch da ist und sich in der Anschauung des Reliefs der betrachteten Körperfläche zu erkennen gibt. Auch in diesem Falle bleibt, wie bei den Obertönen, die Leichtigkeit und Genauigkeit der Apperzeption hinter der der Perzeption weit zurück.

Zu unserer Vorstellung von der Richtung, in der die gesehenen Gegenstände liegen, müssen noch diejenigen meist den Muskeln angehörigen Empfindungen mitwirken, welche uns die Stellung unseres Körpers, des Kopfes zum Körper, des Auges zum Kopfe erkennen lassen. Wird eine von diesen geändert, z. B. die Empfindung der richtigen Stellung des Auges durch Fingerdruck gegen die Seite des Augapfels oder durch Lähmung eines der Augenmuskeln, so wird dadurch die Anschauung der Lage des Gesehenen geändert. Aber erst durch solche gelegentlich eintretenden Täuschungen erfahren wir, daß zu dem Aggregat von Empfindungen, die der Vorstellung vom Ort eines gesehenen Objektes zugrunde liegen, auch Muskelempfindungen gehören.

Mancherlei Analogie mit den zusammengesetzten Klängen bieten auch die Erscheinungen der Mischfarben, nur daß bei diesen die Zahl der Grundempfindungen sich auf drei reduziert, und die Trennung der zusammengesetzten Empfindungen in ihre einfachen Elemente

noch schwieriger und unvollkommener ist, als im Gebiete der Töne. Daß man alle Farben als Verbindungen von drei Grundfarben ansehen könne, erwähnt als eine damals schon bekannte Sache Waller in den Philosophical Transactions vom Jahre 1686. Diese Ansicht konnte sich in älterer Zeit nur auf die Vergleichung der Empfindungen und die Erfahrungen, welche bei Mischung der Malerfarben gemacht waren, stützen. Die neuere Zeit hat bessere Methoden, verschiedenfarbiges Licht zu mischen, kennen gelehrt und durch genaue Messungen die Richtigkeit jener Hypothese bestätigt, aber auch gleichzeitig gelehrt, daß diese Bestätigungen immer nur bis zu einer gewissen Grenze hin gelingen. Das letztere ist dadurch bedingt, daß keine Art farbigen Lichtes existiert, welche uns ausschließlich und rein eine einzige der Grundfarben zur Empfindung brächte. Selbst die gesättigtsten und reinsten Farben, welche die Außenwelt uns im prismatischen Spektrum darbietet, können durch Entwickelung von Nachbildern der Komplementärfarbe im Auge [1]) noch wie von einem weißen Schleier befreit werden, und sind also noch nicht als absolut rein zu betrachten. Eben deshalb können wir die absolut reinen Grundfarben, aus denen alle anderen Farben ohne Ausnahme zu mischen sein würden, objektiv nicht herstellen. Wir wissen nur, daß sich unter den Spektralfarben Scharlachrot, Spangrün und Blauviolett ihnen von allen objektiven Farben am meisten nähern. Wir können deshalb aus diesen drei objektiven Farben bei weitem die meisten gewöhnlich vorkommenden Farben der verschiedenen Naturkörper zusammensetzen, aber spektrales Gelb und Blau nicht in dem vollkommenen Grade der Sättigung, welchen sie im Zustande größter Reinheit im Spektrum darbieten. Unsere Mischungen sind immer ein wenig weißlicher, als die entsprechenden einfachen Farben des Spektrums. Daraus folgt, daß wir die einfachen Elemente aller unserer Farbenempfindungen im absolut reinen Zustand nie, oder wenigstens nur auf kurze Zeit bei einzelnen besonders dazu angestellten Versuchen zur Anschauung bringen, und also auch kein genaues und sicheres Erinnerungsbild derselben in unserem Gedächtnis tragen können, wie wir es haben müßten, um jede Farbenempfindung nach der Anschauung sicher in ihre Elementarempfin-

[1]) Näheres hierüber siehe v. Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik, 1. Aufl., S. 370; 3. Aufl. II, S. 206; Vorträge und Reden, 3. Aufl. I, S. 284.

dungen rein aufzulösen. Dazu kommt, daß wir verhältnismäßig selten Gelegenheit haben, den Vorgang einer Zusammensetzung von Farben und deren schließliches Resultat zu beobachten und dadurch zu lernen, in dem Zusammengesetzten die Bestandteile wieder zu erkennen. Ja, es scheint mir besonders charakteristisch für diesen Vorgang zu sein, daß man, gestützt auf die Mischung von Malerfarben, anderthalb Jahrhunderte lang, von Waller bis auf Goethe, im Grün eine Mischung von Blau und Gelb zu sehen glaubte, während in Wahrheit das Blau des Himmels und Schwefelgelb, als farbige Lichter und nicht als Pigmente miteinander gemischt, Weiß geben. Eben dahin gehört die heftige Opposition Goethes, der auch nur die Mischung der Pigmentfarben kannte, gegen den Satz, daß Weiß eine Mischung verschiedenfarbigen Lichtes sein könne. Wir dürfen hiernach kaum daran zweifeln, daß dem Gesichtssinn von vornherein die Fähigkeit, die verschiedenen elementaren Bestandteile der Empfindung zu scheiden, fehlt, und daß das Wenige, was beim ausgebildeten Beobachter davon vorhanden ist, durch die gelegentlich gemachten Erfahrungen erlangt worden ist, wobei denn namentlich auch falsch ausgelegte Erfahrungen zu Irrtümern verleiten können.

Für das Ohr dagegen liegen einem jeden Individuum Erfahrungen über die Zusammensetzung zweier oder mehrerer Klänge oder Geräusche in ausgedehntestem Maße vor, und die Fähigkeit, selbst sehr verwickelte musikalische Zusammenklänge in die einzelnen Stimmen der einzelnen sie hervorbringenden Instrumente zu zerlegen, kann von jedem, der seine Aufmerksamkeit darauf wendet, bald erworben werden. Aber die letzten einfachen Elemente der Tonempfindung, die einfachen Töne, werden selten gehört. Selbst diejenigen Tonwerkzeuge, welche sie geben können, wie die Stimmgabeln vor Resonanzröhren, bringen bei stärkerer Erregung teils innerhalb, teils außerhalb des Ohres noch schwache harmonische Obertöne hervor, wie wir im fünften und siebenten Abschnitt sehen werden. Also auch hier ist die Gelegenheit, ein genaues und sicheres Erinnerungsbild dieser einfachen Tonelemente unserem Gedächtnis einzuverleiben, eine sehr beschränkte. Wenn aber von den Summanden nur eine einigermaßen verwaschene und schwankende Kenntnis da ist, so wird auch die Zerlegungsweise der Summe in entsprechendem Maße unsicher werden müssen. Wenn wir nicht ganz sicher wissen, was dem

als Grundton zu betrachtenden Teile des Klanges zuzurechnen ist, so wird auch unsicher, was den Obertönen angehört. Deshalb müssen wir wenigstens im Anfang uns die einzelnen Elemente, die unterschieden werden sollen, vorher einzeln hörbar machen, um eine ganz frische Erinnerung an die Empfindung zu haben, die ihnen entspricht, und das ganze Geschäft erfordert ruhige und gesammelte Aufmerksamkeit. Es fehlt eben die Leichtigkeit dabei, welche wir durch oft wiederholte Erfahrung gewinnen können, während bei der Scheidung musikalischer Akkorde in ihre einzelnen Stimmen uns eine solche zu Hilfe kommt. Bei diesen hören wir die einzelnen Klänge genügend oft einzeln, und beobachten, wie sie sich zum Zusammenklang vereinigen, während wir die einfachen Töne selten vernehmen und den Aufbau zusammengesetzter Klänge aus ihnen fast nie vor unseren Ohren zustande kommen hören.

So ergibt sich dann schließlich als Resultat dieser Diskussion:

1. Daß die Obertöne, welche den einfachen Schwingungen einer zusammengesetzten Luftbewegung entsprechen, empfunden (perzipiert) werden, wenn sie auch nicht immer zur bewußten Wahrnehmung kommen (nicht apperzipiert werden).

2. Daß sie ohne andere Hilfe, als eine zweckmäßige Leitung der Aufmerksamkeit, auch zur bewußten Wahrnehmung gebracht oder apperzipiert werden können.

3. Daß sie aber auch in dem Fall, wo sie nicht isoliert wahrgenommen werden, sondern in die ganze Klangmasse verschmelzen, doch ihre Existenz in der Empfindung erweisen durch die Veränderung der Klangfarbe, wobei sich namentlich auch der Eindruck ihrer größeren Tonhöhe in charakteristischer Weise dadurch äußert, daß die Klangfarbe heller und höher erscheint.

Genaueren Aufschluß über die Beziehungen der Obertöne zur Klangfarbe wird der nächste Abschnitt geben.

Fünfter Abschnitt.

Von den Unterschieden der musikalischen Klangfarbe.

Wir haben am Ende des ersten Abschnittes gesehen, daß die Unterschiede der Klangfarbe abhängen müssen von der Form der Luftschwingungen. Die Gründe für diese Behauptung waren nur negative. Es hatte sich ergeben, daß die Stärke abhängt von der Amplitude der Schwingungen, die Tonhöhe von ihrer Anzahl; so blieb für die Unterschiede der Klangfarbe kein anderer Unterschied der Schallwellen übrig, als der ihrer Schwingungsform. Wir haben dann weiter gesehen, daß von der Schwingungsform auch die Existenz und Stärke der den Grundton des Klanges begleitenden Obertöne abhängt, und müssen daraus schließen, daß Klänge von gleicher Klangfarbe auch immer dieselben Kombinationen von Partialtönen zeigen müssen. Denn die besondere Schwingungsform, welche im Ohr die Empfindung einer gewissen Klangfarbe hervorruft, wird auch immer die Empfindung der ihr entsprechenden Obertöne hervorrufen müssen. Es entsteht also die Frage, ob und inwieweit sich die Verschiedenheiten der Klangfarben darauf zurückführen lassen, daß in verschiedenen Klängen verschiedene Partialtöne in verschiedener Stärke verbunden sind. Wir haben am Ende des vorigen Abschnittes gefunden, daß selbst künstlich zusammengefügte Töne verschmelzen können in einen Klang, dessen Klangfarbe dann merklich abweicht von der seiner beiden Teiltöne, daß also in der Tat die Existenz eines neuen Obertones die Klangfarbe verändert. Dadurch öffnet sich uns ein Weg, um dem bisher durchaus rätselhaften Wesen der Klangfarbe und den Ursachen ihrer Unterschiede auf den Grund kommen zu können.

Zunächst ist indessen zu bemerken, daß man bisher im allgemeinen geneigt war, alle möglichen verschiedenen Eigentümlich-

keiten der Klänge, welche nicht gerade deren Stärke und Tonhöhe betrafen, der Klangfarbe zuzuschreiben, was auch insofern richtig war, als der Begriff der Klangfarbe selbst eben nur negativ definiert werden konnte. Eine leichte Überlegung zeigt nun aber, daß manche von diesen Eigentümlichkeiten der Klänge von der Art und Weise abhängen, wie die Klänge anfangen und enden. Die Arten des Anklingens und Ausklingens sind ja zum Teil so charakteristisch, daß sie für die menschliche Stimme durch eine Reihe verschiedener Buchstaben bezeichnet werden. Es gehören hierher namentlich die explosiven Konsonanten *B, D, G* und *P, T, K*. Diese Buchstaben werden gebildet, indem entweder die verschlossene Mundhöhle geöffnet oder die geöffnete verschlossen wird. Bei *B* und *P* liegt der Verschluß zwischen den Lippen, bei *D* und *T* zwischen Zunge und Oberzähnen, bei *G* und *K* zwischen Zungenrücken und Gaumen. Die Reihe der Mediae *B, D, G* unterscheidet sich von der der Tenues *P, T, K* dadurch, daß bei ersteren die Stimmritze zur Zeit der Öffnung des Verschlusses schon hinreichend verengt ist, um tönen zu können, oder um wenigstens das Luftgeräusch der Flüsterstimme hervorzubringen, daß bei den Tenues dagegen die Stimmritze erweitert ist und nicht tönen kann. Die Mediae sind deshalb vom Stimmton begleitet; dieser kann sogar, wenn sie die Silbe anfangen, schon einen Augenblick vorher einsetzen, und wenn sie die Silbe schließen, noch einen Augenblick länger dauern, als die Öffnung des Mundes, weil etwas Luft auch noch in die verschlossene Mundhöhle eingetrieben werden und die Ansprache der Stimmbänder im Kehlkopf unterhalten kann. Wegen der verengten Stimmritze ist der Zufluß der Luft mäßiger, das Luftgeräusch deshalb weniger scharf als bei den Tenues, welche mit geöffneter Stimmritze gesprochen werden, so daß eine große Menge Luft aus dem Brustkasten auf einmal hervorstürzen kann. Dabei wechselt sehr schnell die Resonanz der Mundhöhle, deren großen Einfluß wir später bei den Vokalen genauer kennen lernen werden, sowie die Tonhöhe, entsprechend der schnell veränderten Größe ihres Volumens und ihrer Öffnung, und dies bedingt einen entsprechend schnellen Wechsel der Klangfarbe des Stimmtones.

Wie bei diesen Buchstaben beruht auch der Unterschied des Klanges angeschlagener Saiten zum Teil auf der Schnelligkeit, mit der der Ton sich verliert. Wenn die Saiten wenig Masse haben

(Darmsaiten) und auf einem leicht beweglichen Resonanzboden befestigt sind (wie an der Violine, Guitarre, Zither), oder wenn die Teile, auf die sie sich stützen oder die sie berühren, wenig elastisch sind (wenn z. B. die Violinsaiten mit der weichen Fingerspitze auf das Griffbrett gedrückt werden), so erlöschen ihre Schwingungen sehr schnell nach dem Anschlag, der Ton wird trocken, kurz und klanglos, wie beim Pizzicato der Violinen. Sind dagegen die Saiten von Metall, und deshalb von größerem Gewicht und starker Spannung, auf starken und schweren Stegen befestigt, die wenig erschüttert werden können, so geben sie ihre Schwingungen nur langsam an die Luft und den Resonanzboden ab; ihre Schwingungen halten länger an, ihr Klang wird dauernder und voller, wie beim Pianoforte, ist aber verhältnismäßig nicht so kräftig und durchdringend, wie bei gleich stark geschlagenen Saiten, welche den Ton schnell abgeben; daher das Pizzicato der Streichinstrumente, gut ausgeführt, viel durchdringender ist als ein Klavierton. Die Klaviere mit schweren und starken Widerlagen für die Saiten haben deshalb einen weniger durchdringenden, aber viel anhaltenderen Ton, als die mit leichteren Widerlagen bei gleicher Saitenstärke.

So liegt andererseits viel Charakteristisches darin, wie die Töne bei den Blechinstrumenten, der Trompete und Posaune, meist abgebrochen und schwerfällig einsetzen. Die verschiedenen Töne werden bei diesen Instrumenten dadurch erzeugt, daß man verschiedene Obertöne der Luftsäule durch verschiedenes Anblasen hervorbringt, wobei diese sich ähnlich einer Saite in schwingende Abteilungen von verschiedener Zahl und Länge teilt. Den neuen Schwingungszustand an Stelle des früheren hervorzurufen, kostet immer eine etwas größere Anstrengung; ist er einmal eingetreten, so läßt er sich mit geringer Kraft des Luftstromes unterhalten. Dagegen geschieht der Übergang von einem Ton zum anderen sehr leicht bei den Holzblasinstrumenten, Flöte, Oboe, Klarinette, wo die Luftsäule durch verschiedene Applikatur der Finger an die Seitenöffnungen und Klappen schnell ihre Länge ändern kann, und die Weise des Anblasens wenig zu ändern ist.

Diese Beispiele mögen genügen, um zu zeigen, wie gewisse charakteristische Eigentümlichkeiten des Klanges mancher Instrumente abhängen von der Art, wie ihr Klang beginnt und wieder aufhört. Wenn wir im folgenden von musikalischer Klangfarbe reden,

sehen wir zunächst von diesen Eigentümlichkeiten des Anfanges und Endes ab, und berücksichtigen nur die Eigentümlichkeiten des gleichmäßig andauernden Klanges.

Aber auch wenn ein Klang mit gleicher oder veränderlicher Stärke andauert, mischen sich ihm bei den meisten Methoden seiner Erregung Geräusche bei als der Ausdruck kleinerer oder größerer Unregelmäßigkeiten der Luftbewegung. Bei den durch einen Luftstrom unterhaltenen Klängen der Blasinstrumente hört man meistenteils mehr oder weniger Sausen und Zischen der Luft, die sich an den scharfen Rändern der Anblaseöffnung bricht. Bei den mit dem Violinbogen gestrichenen tönenden Saiten oder Stäben und Platten hört man ziemlich viel Reibegeräusch des Bogens. Die Haare, mit denen dieser bespannt ist, sind wohl nie ganz frei von vielen, wenn auch sehr kleinen Unregelmäßigkeiten, der harzige Überzug ist nicht absolut gleichmäßig verbreitet, auch treten wohl kleine Ungleichmäßigkeiten in der Führung des Bogens durch den Arm, in der Stärke des Druckes ein, welche auf die Bewegung der Saite von Einfluß sind, so daß der Ton eines schlechten Instrumentes oder eines ungeschickten Spielers wegen dieser Unregelmäßigkeiten rauh, kratzend und veränderlich ausfällt. Über die Beschaffenheit der diesen Geräuschen entsprechenden Luftbewegungen und Gehörempfindungen können wir erst später sprechen, wenn wir den Begriff der Schwebungen erörtert haben. Gewöhnlich sucht man, wenn man Musik hört, diese Geräusche zu überhören, man abstrahiert absichtlich von ihnen, bei näherer Aufmerksamkeit jedoch hört man sie in den meisten durch Blasen und Streichen hervorgebrachten Klängen sehr deutlich. Bekanntlich werden auch viele Konsonanten der menschlichen Sprache durch solche anhaltende Geräusche charakterisiert, wie *F*, *W*, *S*, *Sz*, englisch *Th*, *J*, *Ch*. Bei einigen wird der Klang durch Zitterungen der Mundteile noch unregelmäßiger gemacht, wie beim *R* und *L*. Beim *R* wird der Luftstrom durch Zittern des weichen Gaumens oder der Zungenspitze periodisch ganz unterbrochen, und wir bekommen dadurch einen intermittierenden Klang, dessen eigentümliche knarrende Beschaffenheit eben durch diese Intermissionen hervorgebracht wird. Beim *L* sind es die vom Luftstrom bewegten schlaffen seitlichen Zungenränder, welche zwar nicht vollständige Unterbrechungen, aber doch Schwankungen der Tonstärke hervorbringen.

Aber auch die Vokale der menschlichen Stimme sind nicht ganz frei von solchen Geräuschen, wenn sie auch neben dem musikalischen Teil des Stimmtones mehr zurücktreten. Auf diese Geräusche hat Donders zuerst aufmerksam gemacht; es sind zum Teil dieselben, welche beim leisen, tonlosen Sprechen für die entsprechenden Vokale hervorgebracht werden. Am stärksten sind sie beim *I*, *Ü*, *U*, und bei diesen Vokalen kann man sie auch laut sprechend leicht hörbar machen; durch einfache Verstärkung derselben geht der Vokal *I* in den Konsonanten *J*, und der Vokal *U* in das englische *W* über. Bei *A*, *Ä*, *E*, *O* scheinen mir die Geräusche des leisen Sprechens nur in der Stimmritze hervorgebracht zu werden, und beim lauten Sprechen in den Stimmton aufzugehen. Bemerkenswert ist aber, daß man beim Sprechen die Vokale *A*, *Ä* und *E* in einer tonloseren Weise hervorbringt als beim Singen, indem man unter dem Gefühl stärkerer Pressung im Kehlkopf statt des klangvollen Stimmtones einen mehr knarrenden Ton herausbringt, bei welchem eine deutlichere Artikulation möglich ist. Es scheint hier die Verstärkung des Geräusches die Charakterisierung des besonderen Vokalklanges zu erleichtern. Beim Singen sucht man dagegen den musikalischen Teil des Klanges zu begünstigen, wobei die Artikulation etwas undeutlicher wird.

Wenn nun aber auch in den begleitenden Geräuschen, also in den kleinen Unregelmäßigkeiten der Luftbewegung, viel Charakteristisches für die Klänge der musikalischen Instrumente und für die verschiedener Mundstellung entsprechenden menschlichen Stimmtöne liegt, so bleiben doch auch noch genug Eigentümlichkeiten der Klangfarbe übrig, die an dem eigentlich musikalischen Teil des Klanges, an dem vollkommen regelmäßigen Teil der Luftbewegung haften. Wie wichtig diese letzteren sind, kann man namentlich erkennen, wenn man musikalische Instrumente und menschliche Stimmen aus solcher Entfernung hört, wo die verhältnismäßig schwachen Geräusche nicht mehr hörbar sind. Trotzdem diese mangeln, bleibt es in der Regel möglich, die verschiedenen musikalischen Instrumente voneinander zu unterscheiden, wenn auch allerdings unter solchen Umständen einmal einzelne Horntöne mit Gesang, oder ein Violoncell mit einem Harmonium verwechselt werden kann. Bei der menschlichen Stimme verlieren sich in der Entfernung zuerst die Konsonanten, welche durch Geräusche charakterisiert sind, während *M*, *N* und die

Vokale noch in großer Entfernung erkennbar bleiben. *M* und *N* sind den Vokalen dadurch ähnlich gebildet, daß in keinem Teil der Mundhöhle ein Luftgeräusch gebildet wird, diese vielmehr vollkommen geschlossen ist, und der Stimmton durch die Nase entweicht. Der Mund bildet nur eine Resonanzhöhle, die den Klang verändert. Bei recht stillem Wetter ist es interessant, von hohen Bergen herab die Stimmen der Menschen aus der Ebene zu belauschen. Worte sind dann nicht mehr erkennbar, oder höchstens solche, welche aus *M*, *N* und bloßen Vokalen zusammengesetzt sind, wie Mama, Nein. Aber die in den gesprochenen Worten enthaltenen Vokale unterscheidet man leicht und deutlich. Sie folgen sich in seltsamem Wechsel und wunderlich erscheinenden Tonfällen, weil man sie nicht mehr zu Worten und Sätzen zu verbinden weiß.

Wir wollen in dem vorliegenden Abschnitt zunächst von allen unregelmäßigen Teilen der Luftbewegung, vom Ansetzen und Abklingen des Schalles absehen und nur auf den eigentlich musikalischen Teil des Klanges, welcher einer gleichmäßig anhaltenden, regelmäßig periodischen Luftbewegung entspricht, Rücksicht nehmen und die Beziehungen zu ermitteln suchen zwischen dessen Zusammensetzung aus einzelnen Tönen und der Klangfarbe. Was von den Eigentümlichkeiten der Klangfarbe hierher gehört, wollen wir kurz die musikalische Klangfarbe nennen.

Die Aufgabe des vorliegenden Abschnittes wird es nun sein, die verschiedene Zusammensetzung der Klänge, wie sie von verschiedenen musikalischen Instrumenten hervorgebracht werden, zu beschreiben, um daran nachzuweisen, wie ein verschiedener Charakter in der Kombination der Obertöne gewissen charakteristischen Abarten der Klangfarbe entspricht. Es stellen sich dabei gewisse allgemeine Regeln heraus für diejenigen Anordnungen der Obertöne, welche den in der Sprache als weich, scharf, schmetternd, leer, voll oder reich, dumpf, hell usw. unterschiedenen Arten der Klangfarbe entsprechen. Abgesehen von dem hier zunächst vorliegenden Zweck, die physiologischen Tätigkeiten des Ohres genauer bestimmen zu können, welche zur Unterscheidung der Klangfarbe führen, ein Geschäft, welches dem nächstfolgenden Abschnitt vorbehalten bleibt, sind die Ergebnisse dieser Untersuchung auch deshalb für die Beantwortung rein musikalischer Fragen in späteren Abteilungen dieses Buches von Wichtig-

keit, weil sie uns lehren, wie reich im allgemeinen die musikalisch gut zu verwendenden Klangfarben an Obertönen sind, und welche Eigentümlichkeiten der Klangfarben an solchen musikalischen Instrumenten begünstigt werden, deren Klangfarbe einigermaßen der Willkür des Erbauers überlassen ist.

Da die Physiker über diesen Gegenstand noch verhältnismäßig wenig gearbeitet haben, werde ich gezwungen sein, etwas tiefer auf die Mechanik der Tonerzeugung mehrerer Instrumente einzugehen, als es vielleicht manchem meiner Leser angenehm sein wird. Ein solcher findet die Hauptresultate am Ende dieses Abschnittes zusammengestellt. Andererseits muß ich um Nachsicht bitten, wenn ich in diesem fast ganz neuen Gebiete große Lücken bestehen lassen muß, und mich hauptsächlich auf diejenigen Instrumente beschränke, deren Wirkungsweise so weit bekannt ist, daß wir einen einigermaßen genügenden Einblick in die Entstehung ihrer Klänge gewinnen können. Es liegt hier noch reiches Material für interessante akustische Arbeiten vor; ich selbst mußte mich damit begnügen, hier so viel zu leisten, als für den Fortgang der Untersuchung nötig war.

1. Klänge ohne Obertöne.

Wir beginnen mit denjenigen Klängen, welche nicht zusammengesetzt sind, sondern nur aus einem einfachen Ton bestehen. Am reinsten und leichtesten werden solche hervorgebracht, wenn eine Stimmgabel, angeschlagen, vor die Mündung einer Resonanzröhre gebracht wird, wie es im vorigen Abschnitt schon beschrieben worden ist[1]). Es sind diese Töne ungemein weich, frei von allem Scharfen und Rauhen, sie scheinen, wie schon früher angeführt ist, verhältnismäßig tief zu liegen, so daß schon die, welche ihrer Tonhöhe nach den tiefen Tönen einer Baßstimme entsprechen, den Eindruck einer ganz besonderen und ungewöhnlichen Tiefe machen; die Klangfarbe solcher tiefen einfachen Töne ist auch ziemlich dumpf. Die einfachen Töne der Sopranlage klingen hell, aber auch die den höchsten Sopranlönen entsprechenden sind sehr weich, ohne eine Spur von der schneidenden oder gellenden Schärfe, welche diese Töne auf den meisten Instrumenten zeigen, mit Ausnahme etwa der Flöte, deren

[1]) Wegen der möglichen Störungen s. Beilage IV.

Klänge den einfachen Tönen ziemlich nahe stehen, indem sie wenige und schwache Obertöne haben. Unter den menschlichen Stimmlauten kommt das *U* diesen einfachen Tönen am nächsten, doch ist auch dieser Vokal nicht ganz frei von Obertönen. Vergleicht man die Klangfarbe eines solchen einfachen Tones mit der eines zusammengesetzten Klanges, dem sich die niedrigeren harmonischen Obertöne anschließen, so hat der letztere etwas Klangvolleres, Metallischeres und Glänzenderes neben dem einfachen Ton. Selbst schon der Vokal *U* der menschlichen Stimme, obgleich er unter allen der dumpfeste und klangloseste ist, klingt merklich glänzender und weniger dumpf als ein gleich hoher einfacher Ton. Wenn wir die Reihe der sechs ersten Partialtöne eines zusammengesetzten Klanges überblicken, so können wir letzteren in musikalischer Beziehung als einen Durakkord mit überwiegend starkem Grundton betrachten, und wirklich hat auch ein solcher Klang, z. B. ein schöner Gesangton, neben einem einfachen Ton in der Klangfarbe ganz deutlich etwas von der angenehmen Wirkung eines harmonischen Akkordes.

Da die Form einfacher Wellen vollständig gegeben ist, wenn ihre Schwingungsweite gegeben ist, so können einfache Töne nur Unterschiede der Stärke, aber nicht der musikalischen Klangfarbe darbieten. In der Tat ist der Klang derselben ganz gleich, ob wir nun nach den oben beschriebenen Methoden den Grundton einer Stimmgabel mittels einer Resonanzröhre aus beliebigem Material, Glas, Metall oder Pappe, oder mittels einer Saite an die Luft leiten, wenn man dafür sorgt, daß nichts an dem Apparat klirren kann.

Einfache Töne, die nur von einem Luftreibegeräusch begleitet sind, kann man auch erhalten, wie oben erwähnt ist, wenn man bauchige Flaschen anbläst. Wenn man von der Luftreibung abstrahiert, so ist die eigentlich musikalische Klangfarbe dieser Töne wirklich dieselbe, wie die der Stimmgabeltöne.

2. Klänge mit unharmonischen Obertönen.

An diese Töne ohne Obertöne schließen sich zunächst solche Klänge an, deren Nebentöne unharmonisch zum Grundton sind, und welche deshalb, unserer Definition entsprechend, streng genommen, nicht zu den musikalischen Klängen gerechnet werden können. Sie werden auch nur ausnahmsweise in der künstlerischen Musik gebraucht

und, wo es geschieht, nur in solcher Anschlagsweise, daß der Grundton die Nebentöne an Stärke bei weitem übertrifft, so daß deren Existenz vernachlässigt werden kann. Daher stelle ich sie hier unmittelbar hinter die einfachen Töne, weil sie musikalisch nur in Betracht kommen, insofern sie mehr oder weniger gut einfache Töne darstellen. Zunächst gehören die Stimmgabeln selbst hierher, wenn man sie anschlägt, und dann auf einen Resonanzboden setzt, oder dem Ohr sehr nahe bringt. Die Obertöne der Stimmgabeln liegen sehr hoch; der erste machte bei den von mir untersuchten Gabeln 5,8 bis 6,6 mal soviel Schwingungen als der Grundton, liegt also zwischen der dritten verminderten Quinte und großen Sext des Grundtones. Die Schwingungszahlen dieser hohen Obertöne verhalten sich zueinander wie die Quadrate der ungeraden Zahlen. In der Zeit, wo der erste angeführte Oberton $3 . 3 = 9$ Schwingungen macht, machen die folgenden $5 . 5 = 25$, $7 . 7 = 49$ usw. Schwingungen. Ihre Höhe steigt also außerordentlich schnell, und sie sind in der Regel alle unharmonisch zum Grundton, einzelne von ihnen können aber durch Zufall auch harmonisch werden. Nennen wir den Grundton der Stimmgabel *c*, so sind die folgenden Töne etwa as^{II}, d^{IV}, cis^{V}. Diese hohen Nebentöne bewirken neben dem Grundton ein helles unharmonisches Klingen, welches auch leicht beim Anschlagen der Gabel aus weiterer Entfernung gehört wird, während man den Grundton nur hört, wenn man die Gabel dicht an das Ohr bringt. Das Ohr trennt den Grundton leicht von den Obertönen, und hat keine Neigung, beide zu verschmelzen. Die hohen Töne verklingen gewöhnlich schnell, während der Grundton lange stehen bleibt. Übrigens ist zu bemerken, daß das Verhältnis der Stimmgabeltöne zueinander etwas verschieden ist nach der Form der Gabel, und die gemachten Angaben deshalb nur als annähernd betrachtet werden dürfen. Bei der theoretischen Bestimmung der höheren Töne kann jede Zinke der Stimmgabel als ein an einem Ende fester Stab betrachtet werden.

Ähnlich verhält es sich mit den geraden elastischen Stäben; auch diese geben, wie schon angeführt wurde, beim Anschlagen ziemlich hohe unharmonische Obertöne. Wenn man solche Stäbe an der Stelle der beiden Knotenlinien ihres Grundtones auf einer Unterlage festhält, so begünstigt man dadurch allerdings das Fortklingen des Grundtones vor allen anderen höheren Tönen, und die höheren Töne

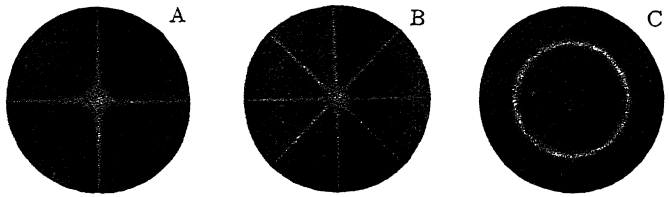
stören wenig, weil sie schnell nach dem Anschlagen erlöschen; aber zur eigentlich künstlerischen Musik bleiben solche Stäbe trotzdem wenig anwendbar, obgleich man sie in der Militär- und Tanzmusik ihres durchdringenden Tones wegen neuerdings verwendet hat. Früher hat man auch Glas- und Holzstäbe ähnlich verwendet, zur Glasstabharmonika und Strohfiedel oder Holzharmonika. Die Stäbe werden zwischen zwei Paar zusammengedrehter Schnüre eingeschoben, so daß sie zwischen diese am Ort der beiden Knotenlinien des Grundtones eingeklemmt sind. Die Holzstäbe der Strohfiedel ließ man auch einfach auf Strohzylindern ruhen. Sie werden mit hölzernen oder Korkhämmern geschlagen.

Das Material der Stäbe hat auf die Klangfarbe hierbei wohl nur dadurch Einfluß, daß es mehr oder weniger lange die Töne verschiedener Höhe nachklingen läßt. Am längsten pflegen die Töne, namentlich auch die hohen, in elastischem Metall von feinem, gleichmäßigem Gefüge nachzuklingen, weil dies durch seine große Masse ein größeres Bestreben hat, in der einmal angenommenen Bewegung zu verharren, und weil wir unter den Metallen beim Stahl, den besseren Kupferzink- und Kupferzinnlegierungen auch die vollkommenste Elastizität finden. Bei den schwach legierten edlen Metallen wird das Beharren des Klanges trotz der geringeren Elastizität durch die große Schwere gesteigert. Die vollkommenere Elastizität scheint besonders das Fortbestehen der höheren Töne zu begünstigen, da schnellere Schwingungen im allgemeinen durch unvollkommene Elastizität und durch Reibung schneller gedämpft werden als langsamere Schwingungen. Das allgemeine Kennzeichen dessen, was man metallische Klangfarbe zu nennen pflegt, glaube ich deshalb dadurch bezeichnen zu können, daß verhältnismäßig hohe Obertöne anhaltend und in gleichmäßigem Fluß mitklingen. Die Klangfarbe des Glases ist ähnlich; aber da man ihm nicht starke Erschütterungen zumuten darf, bleibt der Ton immer schwach und zart, auch ist er verhältnismäßig hoch und verklingt schneller wegen der geringeren Masse des schwingenden Körpers. Beim Holz dagegen ist die Masse gering, die innere Struktur verhältnismäßig grob, mit zahllosen kleinen Hohlräumen erfüllt, die Elastizität verhältnismäßig unvollkommen, deshalb verklingen die Töne und namentlich die höheren Töne schnell. Eben deshalb aber ist die Strohfiedel vielleicht den Ansprüchen eines

musikalischen Ohres mehr entsprechend, als die aus Stahl- oder Glasstäben gebildete Harmonika mit den gellenden unharmonischen Obertönen, soweit eben einfache Töne zur Musik geeignet sind, worüber später mehr.

Man braucht bei allen diesen Schlaginstrumenten Hämmer aus Holz oder Kork, überzieht diese auch wohl noch mit Leder; dadurch werden die höchsten Obertöne schwächer, als wenn man harte Metallhämmer nimmt. Letztere würden größere Diskontinuitäten in der anfänglichen Bewegung der Platte geben. Ich werde diesen Einfluß

Fig. 21.



bei dem Anschlag der Saiten näher besprechen, wo er sich in ähnlicher Weise äußert.

Ebene elastische Scheiben, kreisförmig, oval, quadratisch, rechteckig, dreieckig oder sechseckig geschnitten, können nach Chladnis Entdeckung in einer großen Zahl verschiedener Formen schwingen und dabei Töne geben, welche im allgemeinen unharmonisch zueinander sind. In Fig. 21 sind die einfacheren Schwingungsformen einer kreisförmigen Scheibe dargestellt; viel kompliziertere Schwingungsformen entstehen, wenn noch mehr Kreise oder Durchmesser als Knotenlinien auftreten, oder Kreise sich mit Durchmessern verbinden. Wenn die Schwingungsform *A* den Ton *c* gibt, geben die anderen folgenden Töne:

Anzahl der Knotenkreise	Anzahl der Durchmesser					
	0	1	2	3	4	5
0			*c*	*d'*	*c''*	*g''* — *gis''*
1	*gis*	*b'*	*g''*			
2	*gis''* +					

Man sieht, wie viele einander verhältnismäßig nahe liegende Töne eine solche Scheibe gibt. So oft man die Scheibe anschlägt, erklingen alle diejenigen unter ihren Tönen, welche an der geschlagenen

Stelle keinen Knotenpunkt haben. Das Auftreten von bestimmten einzelnen Tönen kann man indessen dadurch begünstigen, daß man die Scheibe in solchen Punkten unterstützt, die den Knotenlinien der gewünschten Töne angehören; dann verklingen alle diejenigen Töne schneller, die in den berührten Punkten keine Knotenlinien bilden können. Unterstützt man z. B. eine kreisförmige Scheibe in drei Punkten des Knotenkreises in Fig. 21 *C*, und schlägt genau im Mittelpunkt an, so erhält man den Ton der genannten Schwingungsform, der in unserer Tabelle *gis* genannt ist, und es werden alle Töne sehr schwach, unter deren Knotenlinien Durchmesser des Kreises sind [1]), also die Töne *c*, *d'*, *c''*, *g''*, *b'* unserer Tabelle. Ebenso verklingt der Ton *gis''* mit zwei Knotenkreisen sogleich, weil die Unterstützungspunkte in einen seiner Schwingungsbäuche fallen, und es kann erst der Ton mit drei Knotenkreisen stärker mitklingen, dessen eine Knotenlinie der von Fig. 21 *C* ziemlich nahe kommt. Dieser ist drei Oktaven und mehr als einen ganzen Ton höher, als der Ton mit einem Knotenkreis und stört diesen nicht sehr wegen des großen Intervalles. Deshalb gibt ein solcher Anschlag der Scheibe einen ziemlich guten musikalischen Klang, während sonst im allgemeinen der Klang der Scheiben, aus vielen unharmonischen und nahe aneinander liegenden Tönen gemischt, hohl und kesselartig klingt, und musikalisch nicht brauchbar ist. Aber auch bei zweckmäßiger Unterstützung verklingt er gewöhnlich schnell, wenigstens wenn die Scheiben aus Glas bestehen, weil die Berührung mehrerer Punkte, selbst wenn es Knotenpunkte sind, die Freiheit der Schwingungen immer merklich beeinträchtigt.

Der Klang der Glocken ist ebenfalls von unharmonischen Nebentönen begleitet, die aber nicht so nahe wie bei den ebenen Platten aneinander liegen. Die gewöhnlich eintretenden Schwingungsarten sind solche, wo sich 4, 6, 8, 10 usw. Knotenlinien bilden, welche von dem Scheitelpunkt nach dem Rand der Glocke in gleichen Abständen voneinander herablaufen. Die entsprechenden Töne sind bei Glasglocken, welche überall ziemlich gleiche Dicke haben, nahehin den Quadraten der Zahlen 2, 3, 4, 5 proportional, also wenn wir den tiefsten *c* nennen:

[1]) Vorausgesetzt, daß die unterstützten Stellen nicht etwa in eines der Systeme gleich weit abstehender Durchmesser hineinpassen.

Zahl der Knotenlinien	4	6	8	10	12
Töne	*c*	*d'*	*c''*	*gis''* —	*d'''* —

Die Töne ändern sich aber, wenn die Wand der Glocke nach dem Rand zu dünner oder dicker wird, und es scheint ein wesentlicher Punkt in der Kunst des Glockengusses zu sein, daß man die tieferen Töne durch eine empirisch gefundene, passende Form der Glocke zueinander harmonisch machen kann. Nach Beobachtungen des Herrn Organisten Gleitz[1]) gibt die im Jahre 1477 gegossene Glocke des Domes zu Erfurt folgende Töne: *E, e, gis, h, e', gis', h', cis''*. Die Glocke der Paulskirche in London gibt *a* und *cis'*; Hemony in Zütphen, ein Meister des 17. Jahrhunderts, verlangte von einer guten Glocke drei Oktaven, zwei Quinten, eine große und eine kleine Terz. Der stärkste Ton ist nicht der tiefste; der Kessel der Glocken, angeschlagen, gibt tiefere Töne als der Schallring, letzterer dagegen die lautesten. Übrigens sind auch wohl noch andere Schwingungsformen der Glocke möglich, wobei sich Knotenkreise bilden, die dem Rand parallel sind; diese scheinen aber schwer zu entstehen und sind noch nicht untersucht.

Wenn eine Glocke nicht ganz symmetrisch in Beziehung auf ihre Achse ist, z. B. die Wand an einer Stelle ihres Umfanges etwas dicker als an anderen, so gibt die Glocke beim Anschlag im allgemeinen zwei ein wenig voneinander verschiedene Töne, die miteinander Schwebungen geben. Man findet vier um rechte Winkel voneinander entfernte Stellen des Randes, wo nur der eine dieser Töne ohne Schwebungen hörbar wird, vier andere dazwischen liegende, wo nur der andere erklingt; wenn man irgend eine andere Stelle anschlägt, erklingen beide und geben die Schwebungen, welche man bei den meisten Glocken hört, wenn dieselben ruhig ausklingen.

Die gespannten Membranen geben wieder unharmonische Töne, die einander ziemlich nahe liegen; diese würden, für eine kreisförmige Membran nach der Tonhöhe geordnet, wenn der tiefste Ton *c* ist, im luftleeren Raum folgende sein:

---

[1]) Geschichtliches über die große Glocke und die übrigen Glocken des Domes zu Erfurt. Erfurt 1867. — Siehe auch Schafhäutl im Kunst- und Gewerbeblatt für das Königreich Bayern 1868, 54, 325—350, 385—427.

Zahl der Knotenlinien		Ton
Durchmesser	Kreise	
0	0	*c*
1	0	*as*
2	0	*cis'* + 0,1
0	1	*d'* + 0,2
1	1	*g'* − 0,2
0	2	*b'* + 0,1

Diese Töne verklingen sehr schnell. Tönen die Membranen in Luft[1]) oder werden sie mit einem Luftraum verbunden, wie in der Pauke, so wird dadurch das Verhältnis der Töne abgeändert. Nähere Untersuchungen über die Beitöne des Paukentones fehlen noch. Die Pauke wird zwar in der künstlerischen Musik gebraucht, aber doch nur, um einzelne Akzente zu geben; man stimmt sie zwar ab, aber nicht, um durch ihren Ton die Akkorde zu füllen, sondern nur damit sie nicht störend in die übrige Harmonie einfalle.

Das Gemeinsame der bisher beschriebenen Instrumente ist, daß sie angeschlagen unharmonische Obertöne geben; sind diese naheliegend zum Grundton, so ist der Klang in hohem Grad unmusikalisch, schlecht und kesselähnlich. Sind die Nebentöne weit entfernt vom Grundton und schwach, so wird der Ton zwar musikalischer, wie bei den Stimmgabeln, der Stabharmonika, den Glocken, und brauchbar für Märsche und andere rauschende Musik, die den Rhythmus besonders hervorzuheben hat, aber in der eigentlich künstlerischen Musik hat man, wie oben bemerkt wurde, dergleichen Instrumente noch immer verschmäht, und wohl mit Recht. Denn die unharmonischen Nebentöne, wenn sie auch schnell verklingen, stören doch die Harmonie in sehr unangenehmer Weise, wenn sie sich bei jedem Anschlag neu wiederholen. Einen äußerst schlagenden Beweis davon gab eine Gesellschaft von (angeblich schottischen) Glockenspielern, welche neuerdings herumreiste und allerlei Musikstücke, zum Teil ziemlich künstlicher Art, ausführte. Die Präzision und Geschicklichkeit in der Ausführung war anerkennenswert, der musikalische Effekt aber abscheulich wegen der Masse falscher Beitöne, welche die Musik begleiteten, trotzdem daß die einzelnen angeschlagenen

[1]) Siehe J. Bourget, Institut 38, 189—190 (1870).

Glocken, sobald die Dauer ihrer Note abgelaufen war, dadurch gedämpft wurden, daß sie auf einen mit Tuch überzogenen Tisch gesetzt wurden.

Man kann die genannten Körper mit unharmonischen Klängen auch durch den Violinbogen in Tönung bringen und dabei durch passende Dämpfung in den Knotenlinien des gewünschten Tones die nächsten Nebentöne beseitigen. Es klingt dann der eine Ton kräftig über alle anderen hervor und wäre also eher musikalisch zu brauchen; aber der Violinbogen gibt auf allen diesen Körpern mit unharmonischen Obertönen, Stimmgabeln, Platten, Glocken, ein heftig kratzendes Geräusch, und bei der Untersuchung mit den Resonanzröhren zeigt sich, daß dieses Geräusch hauptsächlich durch die unharmonischen Nebentöne der Platte gebildet ist, welche in kurzen, unregelmäßigen Stößen hörbar werden. Daß intermittierende Töne den Eindruck des Knarrens oder Kratzens geben, ist schon früher erwähnt. Nur wenn der vom Bogen erregte Körper harmonische Obertöne hat, kann er sich jedem Bewegungsanstoß, den der Bogen ihm mitteilt, vollständig fügen und gibt einen vollständig musikalischen Ton. Das beruht darin, daß eben jede beliebige periodische Bewegung, wie sie der Bogen hervorzubringen strebt, aus den Bewegungen, die den harmonischen Obertönen entsprechen, zusammengesetzt werden kann, aber nicht aus anderen unharmonischen Schwingungsbewegungen.

3. Klänge der Saiten.

Wir gehen nun über zur Analyse der eigentlich musikalischen Klänge, welche durch harmonische Obertöne charakterisiert sind. Wir können sie am besten einteilen nach der Art, wie der Ton erregt wird, in solche, die 1. entweder durch Anschlag, 2. oder durch den Bogen, 3. oder durch Blasen gegen eine scharfe Kante, 4. durch Blasen gegen elastische Zungen zum Tönen kommen. Die beiden ersten Klassen umfassen allein Saiteninstrumente, da die Saiten außer den musikalisch nicht gebrauchten longitudinal schwingenden Stäben die einzigen festen elastischen Körper sind, welche reine harmonische Obertöne geben. In die dritte Klasse gehören die Flöten und die Flötenwerke der Orgel, in die vierte die übrigen Blasinstrumente und die menschliche Stimme.

Saiten durch Anschlag erregt. Von den jetzt gebräuchlichen musikalischen Instrumenten gehören hierher das Fortepiano, die Harfe, Guitarre, Zither, von den physikalischen das Monochord, eingerichtet zur genaueren Untersuchung der Gesetze der Saitenschwingungen; auch ist das Pizzicato der Streichinstrumente hierher zu rechnen. Daß die geschlagenen und gerissenen Saiten Klänge mit einer großen Menge von Obertönen geben, ist schon früher erwähnt worden. Für die gerissenen Saiten haben wir den Vorteil, eine ausgebildete Theorie ihrer Bewegung zu besitzen, aus der sich die Stärke ihrer Obertöne unmittelbar ergibt. Schon im vorigen Abschnitt haben wir einen Teil der Folgerungen aus dieser Theorie mit der Erfahrung verglichen und als damit übereinstimmend gefunden. Eine ebenso vollständige Theorie läßt sich für den Fall aufstellen, wo eine Saite mit einem harten, scharfkantigen Körper in einem ihrer Punkte geschlagen worden ist. Weniger einfach ist das Problem, wenn weiche, elastische Hämmer, wie die des Klaviers, die Saite treffen, doch läßt sich auch in diesem Fall für die Bewegung der Saite eine Theorie geben, welche wenigstens die wesentlichsten Züge des Vorganges umfaßt und über die Stärke der Obertöne Rechenschaft gibt[1]).

Die Stärke der Obertöne im Klang einer angeschlagenen Saite hängt im allgemeinen ab:

1. von der Art des Anschlages,
2. „ „ Stelle des Anschlages,
3. „ „ Dicke, Steifigkeit und Elastizität der Saite.

Was zunächst die Art des Anschlages betrifft, so kann die Saite entweder gerissen werden, indem man sie mit dem Finger oder einem Stift (Plektrum, Ring der Zitherspieler) zur Seite zieht und dann losläßt. Es ist diese Art, den Ton zu erregen, bei einer großen Zahl alter und neuer Saiteninstrumente gebräuchlich. Unter den modernen nenne ich nur Harfe, Guitarre und Zither. Oder die Saite kann geschlagen werden mit einem hammerartigen Körper, wie es beim Fortepiano und seinen älteren Abarten, dem Spinett usw., geschieht. Ich habe schon oben bemerkt, daß die Stärke und Zahl der hohen Obertöne desto bedeutender ist, je mehr und je schärfere Diskontinuitäten die Art der Bewegung zeigt. Dies bedingt nun

[1]) Siehe Beilage Nr. V.

auch den Unterschied bei verschiedener Erregungsweise einer Saite. Wenn die Saite gerissen wird, entfernt der Finger sie, ehe er sie losläßt, in ihrer ganzen Länge aus ihrer Gleichgewichtslage. Eine Diskontinuität entsteht an der Saite nur dadurch, daß sie da, wo sie um den Finger oder den Stift, mit dem sie gerissen wird, sich umlegt, eine mehr oder minder scharfe Ecke bildet. Diese Ecke ist schärfer, wenn sie mit einem spitzen Stift gerissen wird, als wenn es mit dem Finger geschieht. Deshalb hört man auch im ersten Fall einen schärferen Klang mit einer größeren Menge hoher klimpernder Obertöne, als im letzteren Fall. Doch ist die Intensität des Grundtones in jedem Fall größer als die eines jeden Obertones. Wird die Saite geschlagen, und zwar mit einem scharfkantigen, metallenen Hammer, der gleich wieder abspringt, so wird nur der einzige Punkt, der vom Schlag getroffen ist, direkt in Bewegung gesetzt. Unmittelbar nach dem Schlag ist der übrige Teil der Saite noch in Ruhe, er gerät erst in Bewegung, indem an dem geschlagenen Punkt eine Beugungswelle entsteht und über die Saite hin und her läuft. Die Beschränkung der ursprünglichen Bewegung auf einen Punkt der Saite gibt die schärfste Diskontinuität und dementsprechend eine lange Reihe von Obertönen, deren Intensität[1]) zum großen Teil der des Grundtones gleichkommt oder ihn übertrifft. Wenn der Hammer weich elastisch ist, hat die Bewegung auf der Saite Zeit, sich auszubreiten, ehe der Hammer wieder zurückspringt, und durch den Anschlag eines solchen Hammers wird der geschlagene Teil der Saite nicht ruckweise in Bewegung gesetzt, sondern seine Geschwindigkeit wächst allmählich und stetig während der Berührungszeit des Hammers. Dadurch wird die Diskontinuität der Bewegung sehr vermindert, um so mehr, je weicher der Hammer ist, und dementsprechend nimmt die Stärke der hohen Obertöne bedeutend ab.

Man kann sich an jedem Fortepiano, dessen Deckel man öffnet, von der Richtigkeit des Gesagten leicht überzeugen. Wenn man eine der Tasten durch ein aufgesetztes Gewicht herabdrückt, wird die entsprechende Saite von ihrem Dämpfer frei und man kann sie nun nach Belieben mit dem Finger oder mit einem Stift reißen, mit

[1]) Wenn hier von Intensität die Rede ist, so ist sie immer objektiv gemessen, nämlich durch die lebendige Kraft oder das mechanische Arbeitsäquivalent der entsprechenden Bewegung.

einem metallenen Stift oder mit dem Pianofortehammer schlagen. Man erhält dabei ganz verschiedene Klangarten. Wenn man mit hartem Metall reißt oder schlägt, ist der Ton scharf und klimpernd und man hört bei einiger Aufmerksamkeit leicht eine große Menge sehr hoher Töne darin. Diese fallen weg, der Klang der Saite wird weniger hell, weicher und wohlklingender, wenn man mit dem weichen Finger reißt oder mit dem weichen Hammer des Instrumentes anschlägt. Auch die verschiedene Stärke des Grundtones erkennt man leicht. Wenn man mit Metall schlägt, hört man ihn kaum; der Klang hört sich dementsprechend ganz leer an. Die Eigentümlichkeit des Klanges nämlich, welche wir mit dem Namen der Leerheit belegen, entsteht, wenn die Obertöne verhältnismäßig zu stark gegen den Grundton sind. Am vollsten hört man den Grundton, wenn man mit dem weichen Finger die Saite zupft, wobei der Ton voll und doch harmonisch klingend ist. Der Anschlag mit dem Pianofortehammer gibt wenigstens in den mittleren und tieferen Oktaven des Instrumentes den Grundton nicht so voll, wie das Reißen der Saite.

Hierin ist der Grund zu suchen, warum es vorteilhaft ist, die Pianofortehämmer mit dicken Lagen stark gepreßten und dadurch elastisch gewordenen Filzes zu überziehen. Die äußersten Lagen sind die weichsten und nachgiebigsten, die tieferen sind fester. Die Oberfläche des Hammers legt sich ohne hörbaren Stoß der Saite an, die tieferen Lagen geben namentlich die elastische Kraft, durch welche der Hammer wieder von der Saite zurückgeworfen wird. Nimmt man einen Klavierhammer heraus und läßt ihn kräftig gegen eine Tischplatte oder gegen die Wand schlagen, so springt er auch von solchen unnachgiebigen Flächen zurück, wie ein Kautschukball. Je schwerer der Hammer und je dicker die Filzlagen sind, was namentlich bei den Hämmern der tieferen Oktaven der Fall ist, desto länger muß es währen, ehe er von der Saite abspringt. Die Hämmer der höheren Oktaven pflegen leichter zu sein und dünnere Filzlagen zu haben. Offenbar haben die Erbauer der Instrumente durch die Praxis hier gewisse Verhältnisse allmählich ausgefunden, wie die Elastizität des Hammers dem Ton der Saite sich am besten anpaßt. Die Beschaffenheit des Hammers hat einen außerordentlich großen Einfluß auf die Klangfarbe. Die Theorie ergibt, daß diejenigen Obertöne beim Anschlag besonders begünstigt werden, deren halbe Schwin-

gungsdauer nahe gleich ist der Zeit, während welcher der Hammer anliegt, daß dagegen diejenigen verschwinden, deren halbe Schwingungsdauer 3, 5, 7 usw. mal so groß ist.

Im allgemeinen wird es vorteilhaft sein, namentlich bei den tieferen Tönen, daß aus der Reihe der Obertöne diejenigen wegfallen, welche einander zu nahe liegen, um einen guten Zusammenklang zu geben, was etwa vom siebenten oder achten an der Fall ist. Die von noch höherer Ordnungszahl sind an sich schon verhältnismäßig schwach. An einem neuen Flügel der Herren Steinway von New York, der sich durch die Gleichmäßigkeit seiner Klangfarbe auszeichnet, finde ich, daß die durch die Dauer des Schlages bedingte Dämpfung in den tieferen Lagen auf den neunten oder zehnten Partialton fällt, in den höheren Lagen dagegen sind schon der vierte und fünfte durch den Anschlag des Hammers kaum noch hervorzubringen, während sie beim Reißen mit dem Fingernagel deutlich hörbar werden. Bei einem älteren und viel gebrauchten Flügel dagegen, der ursprünglich die Hauptdämpfung in der Gegend des siebenten bis fünften Partialtones in den mittleren und tiefen Lagen zeigte, sind jetzt der neunte bis dreizehnte Ton stark entwickelt, was auf härter gewordene Hämmer schließen läßt und dem Klang jedenfalls nur nachteilig sein kann. Beobachtungen über die Verhältnisse lassen sich nach der auf Seite 90 erwähnten Methode gut in der Weise anstellen, daß man die Fingerspitze leicht auf einen der Knotenpunkte desjenigen Tones legt, dessen Stärke man ermitteln will, und dann mittels der Taste den Hammer zum Anschlag bringt. Indem man für den berührenden Finger diejenige Stelle sucht, wo der gewünschte Ton am reinsten herauskommt und am längsten nachklingt, kann man die Stelle des Knotenpunktes leicht ganz genau finden. Die Knotenpunkte, welche der Anschlagsstelle des Hammers sehr nahe liegen, sind allerdings meist durch den Dämpfer gedeckt, aber die betreffenden Töne sind aus einem gleich zu besprechenden Grund doch verhältnismäßig schwach. Übrigens spricht der fünfte Ton auch gut an, wenn man um zwei Fünftel vom Ende entfernt berührt, und der siebente in zwei Siebentel der Saitenlänge. Diese letzteren Stellen sind aber frei vom Dämpfer. Überhaupt findet man alle bei der gebrauchten Anschlagsweise der Saite zum Vorschein kommenden Partialtöne, wenn man immer wiederholt anschlägt und

den berührenden Finger dabei allmählich über die Länge der Saite verschiebt, wobei namentlich die Berührung des kürzeren Endes der Saite zwischen dem Anschlagsende und dem Steg die musikalisch nicht wünschenswerten höheren Obertöne vom neunten bis zum sechzehnten hören läßt.

Wie sich die Stärke der einzelnen Obertöne berechnet, wenn die Anschlagsdauer des Hammers gegeben ist, wird weiter unten mitgeteilt werden.

Der zweite Umstand, welcher auf die Zusammensetzung des Klanges Einfluß hat, ist die Anschlagsstelle. Es ist schon im vorigen Abschnitt bei der Prüfung des von Ohm für die Analyse der Klänge durch das Ohr aufgestellten Gesetzes bemerkt worden, daß sowohl im Klang gerissener als geschlagener Saiten diejenigen Obertöne fehlen, welche am Ort des Anschlages einen Knotenpunkt haben. Umgekehrt sind diejenigen anderen verhältnismäßig am stärksten, welche an der geschlagenen Stelle ein Schwingungsmaximum haben. Überhaupt, wenn man dieselbe Art des Anschlages nacheinander bei verschiedenen Punkten der Saite anwendet, wachsen die einzelnen Obertöne oder nehmen ab in demselben Verhältnis, wie die Schwingungsstärke der entsprechenden einfachen Schwingung der Saite an den betreffenden Punkten ihrer Länge größer oder kleiner ist. So kann denn die Zusammensetzung des Saitenklanges mannigfach abgeändert werden, indem man nichts tut, als den Ort des Anschlages ändern.

Schlägt man die Saite z. B. gerade in ihrer Mitte, so fällt ihr zweiter Ton fort, dessen einziger Knotenpunkt dort liegt. Der dritte Ton dagegen, dessen Knotenpunkte in $^1/_3$ und $^2/_3$ der Saitenlänge liegen, tritt kräftig heraus, weil die Anschlagsstelle in der Mitte dieser beiden Knotenpunkte liegt. Der vierte Ton hat seine Knotenpunkte in $^1/_4$, $^2/_4$ ($= ^1/_2$) und $^3/_4$ der Saitenlänge. Er bleibt aus, weil die Anschlagsstelle mit seinem zweiten Knotenpunkte zusammenfällt, ebenso der sechste, achte, überhaupt alle geradzahligen Töne, während der fünfte, siebente, neunte und die anderen ungeradzahligen gehört werden. Durch das Ausbleiben der geradzahligen Töne erhält die Saite, in der Mitte angeschlagen, in der Tat eine eigentümliche Klangfarbe, die sich von dem gewöhnlichen Saitenklang wesentlich unterscheidet; sie klingt einigermaßen hohl oder näselnd. Der

Versuch läßt sich leicht an jedem Pianoforte ausführen, nachdem man es geöffnet und den Dämpfer gehoben hat. Die Mitte der Saite findet man schnell hinreichend genau, indem man die Stelle sucht, wo man mit dem Finger die Saite leise berühren muß, um beim Anschlag den ersten Oberton rein und klingend zu erhalten.

Schlägt man in $^1/_3$ der Saitenlänge an, so fällt der dritte, sechste, neunte usw. Ton fort. Auch dies gibt dem Klang etwas Hohles, obgleich viel weniger als der Anschlag in der Mitte. Wenn man mit der Anschlagsstelle dem Ende der Saite sehr nahe rückt, so wird das Hervortreten sehr hoher Obertöne auf Kosten des Grundtones und der niederen Obertöne begünstigt, der Klang der Saite wird dadurch leer und klimpernd.

In den Pianofortes ist bei den mittleren Saiten die Anschlagsstelle auf $^1/_7$ bis $^1/_9$ der Saitenlänge verlegt; wir müssen annehmen, daß diese Stelle hauptsächlich deshalb gewählt ist, weil sie erfahrungsgemäß den musikalisch schönsten und für harmonische Verbindungen brauchbarsten Klang liefert. Es hat dazu keine Theorie geleitet, sondern allein das Bedürfnis des künstlerisch gebildeten Ohres und die technische Erfahrung zweier Jahrhunderte. Es ist deshalb die Untersuchung der Zusammensetzung des Klanges bei dieser Anschlagsstelle von besonderem Interesse. Ein wesentlicher Vorzug für die Wahl dieser Stelle scheint darin zu liegen, daß der siebente und neunte Partialton des Klanges wegfallen oder mindestens sehr schwach werden. Es sind diese Töne die ersten in der Reihe, welche dem Durdreiklang des Grundtones nicht angehören. Bis zum sechsten Ton haben wir nur Oktaven, Quinten und große Terzen des Grundtones, der siebente ist nahehin eine kleine Septime, der neunte die große Sekunde des Grundtones. Diese passen also in den Durdreiklang nicht hinein. In der Tat kann man sich an den Pianofortes leicht überzeugen, daß, während es leicht ist, unter Berührung entsprechender Knotenpunkte die sechs ersten Töne wenigstens auf den Saiten der mittleren und unteren Oktaven des Instrumentes durch Anschlag der Taste hören zu lassen, es nicht gelingt, den siebenten, achten und neunten Ton hervorzubringen, oder dieselben wenigstens sehr unvollkommen und schwach hervortreten. Die Schwierigkeit beruht hier nicht in der Unfähigkeit der Saite, so kurze schwingende Abteilungen zu bilden; denn wenn man, statt die Taste anzuschlagen,

die Saite näher nach ihrem Ende hin mit dem Finger reißt und die betreffenden Knotenpunkte dämpft, bekommt man den siebenten, achten, neunten, ja selbst den zehnten und elften Partialton noch sehr gut und klingend. Erst in den höheren Oktaven werden die Saiten zu kurz und steif, um noch hohe Obertöne bilden zu können. Doch pflegen manche Instrumentenmacher die Anschlagsstelle auch näher dem Ende zu wählen, wodurch ein hellerer und durchdringenderer Klang dieser hohen Saiten erzielt wird. Deren Obertöne, welche wegen der Steifigkeit schon schwer ansprechen, werden in solchem Fall durch diese Wahl der Anschlagsstelle dem Grundton gegenüber begünstigt. Einen ähnlich helleren, aber auch dünneren und leeren Klang erhält man, wenn man einer der tieferen Saiten einen Steg näher der Anschlagsstelle unterlegt, so daß der Hammer die Saite jetzt in einem Punkte trifft, der um weniger als $^1/_7$ ihrer Länge von ihrem einen Ende entfernt ist.

Während man einerseits den Klang klimpernder, schärfer und spitzer machen kann, indem man die Saite mit härteren Körpern schlägt, so kann man andererseits den Ton auch dumpfer machen, d. h. den Grundton über die Obertöne überwiegen machen, wenn man mit einem weichen und schweren Hammer schlägt, z. B. mit einem kleinen eisernen Hammer, dessen Schlagfläche mit einer Kautschukplatte überzogen ist. Namentlich die Saiten der tieferen Oktaven geben dann einen viel volleren, aber dumpfen Klang. Um hierbei die verschiedenen Klänge der Saite vergleichen zu können, die der verschiedenen Beschaffenheit des Hammers entsprechen, muß man aber darauf achten, daß man immer in derselben Entfernung von einem beider Enden anschlägt, wie der Hammer des Instrumentes; sonst vermischen sich damit die Änderungen des Klanges, welche von der Lage der Anschlagsstelle abhängen. Diese Umstände sind den Instrumentenmachern natürlich bekannt, da sie ja selbst schon teils schwerere und weichere Hämmer für die tiefen Oktaven, teils leichtere und weniger weiche für die hohen Oktaven gewählt haben. Wenn sie aber denn doch bei einem gewissen Maße der Hämmer stehen geblieben sind und diese nicht weiter in der Weise abgeändert haben, daß die Stärke der Obertöne noch mehr beschränkt wird, so beweist dies klar, daß das musikalisch gebildete Ohr einen mit Obertönen in gewisser Stärke ausgestatteten Klang bei einem Instrument, welches

für reiche Harmonieverbindungen bestimmt ist, vorzieht. In dieser Beziehung ist die Zusammensetzung des Klanges der Klaviersaiten von großem Interesse für die ganze Theorie der Musik. Bei keinem anderen Instrument ist eine so breite Veränderlichkeit der Klangfarbe vorhanden, wie hier; bei keinem anderen kann deshalb das musikalische Ohr sich so frei den seinen Bedürfnissen entsprechenden Klang auswählen.

Ich habe schon oben darauf aufmerksam gemacht, daß bei den Klaviersaiten der mittleren und unteren Oktaven die sechs ersten Partialtöne in der Regel deutlich durch den Anschlag der Taste zu erzeugen sind, und zwar die drei ersten stark, der fünfte und sechste zwar deutlich, aber doch viel schwächer. Der siebente, achte, neunte fehlen, wegen der Lage der Anschlagsstelle; die noch höheren sind immer sehr schwach. Ich lasse zur näheren Vergleichung hier eine Tabelle folgen, in welcher die Intensität der Partialtöne einer Saite für verschiedene Anschlagsweisen theoretisch aus den in den Beilagen entwickelten Formeln berechnet ist. Die Wirkung des Anschlages durch den Hammer hängt ab von der Zeit, während welcher er der Saite anliegt. Diese Zeit ist in der Tabelle angegeben in Teilen der Schwingungsdauer des Grundtones. Außerdem findet sich die Berechnung für eine mit dem Finger gerissene Saite. Die Anschlagsstelle ist stets in $^1/_7$ der Saitenlänge angenommen.

Theoretische Intensität der Partialtöne.

Anschlag in $^1/_7$ der Saitenlänge.

Ordnungszahl des Partialtones	Anschlag durch Reißen	Anschlag durch den Hammer, dessen Berührung dauert				Anschlag mit einem ganz harten Hammer
		$^3/_7$	$^3/_{10}$	$^3/_{14}$	$^3/_{20}$	
		von der Schwingungsdauer des Grundtones				
		c''	g'	$C_I—c'$		
1	100	100	100	100	100	100
2	81,2	99,7	189,4	249	285,7	324,7
3	56,1	8,9	107,9	242,9	357,0	504,9
4	31,6	2,3	17,3	118,9	259,8	504,9
5	13,0	1,2	0,0	26,1	108,4	324,7
6	2,8	0,01	0,5	1,3	18,8	100,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Der besseren Vergleichung wegen ist die Intensität [1]) des Grundtones immer gleich 100 gesetzt worden. Ich habe die berechnete Stärke der Obertöne verglichen mit ihrer Stärke an dem schon erwähnten Flügel, und gefunden, daß die erste mit $^3/_7$ überschriebene Reihe etwa paßt für die Gegend des *c''*. In noch höherer Lage werden die Obertöne noch schwächer als in dieser Kolumne. Beim Anschlag der Taste *c''* bekam ich den zweiten Ton stark, den dritten fast gar nicht mehr. Die zweite mit $^3/_{10}$ überschriebene Kolumne würde etwa entsprechen der Gegend des *g'*, die ersten beiden Obertöne sind hier sehr stark, der vierte Ton schwach. Die dritte Kolumne entspricht den tieferen Saiten vom *c'* an abwärts; die ersten vier Partialtöne sind kräftig da, der fünfte schwächer. In der folgenden Kolumne wird der dritte Partialton stärker als der zweite, was an den Klängen des von mir untersuchten Flügels nicht mehr vorkommt. Bei dem ganz harten Hammer werden endlich der dritte und vierte Ton gleich stark, und die stärksten von allen. Es ergibt sich aus den in der Tabelle zusammengestellten Berechnungen, daß bei den Klavierklängen der mittleren und tieferen Oktaven der Grundton schwächer ist als der erste oder selbst als die beiden Obertöne. Es läßt sich dies auch durch den schon erwähnten Vergleich mit den gerissenen Saiten bestätigen. Auf diesen ist der zweite Ton etwas schwächer als der erste; die letztere, der Grundton, ist aber in dem Klang viel deutlicher, wenn man eine Klaviersaite mit dem Finger reißt, als wenn man sie mittels der Taste anschlägt.

Obgleich es also, wie die Mechanik der höheren Oktaven der Klaviere zeigt, möglich ist, einen Klang hervorzubringen, in welchem der Grundton überwiegt, hat man es doch vorgezogen, den Anschlag der tieferen Saiten so einzurichten, daß die Obertöne bis zum fünften oder sechsten Ton deutlich bleiben, und der zweite und dritte sogar stärker als der erste werden.

Endlich hat, wie ich oben erwähnt habe, auch die Dicke und das Material der Saiten Einfluß auf die Klangfarbe. Es können sich namentlich auf sehr steifen Saiten keine sehr hohen Obertöne bilden, weil solche Saiten nicht leicht in sehr kurzen Abteilungen entgegengesetzte Biegungen annehmen. Man bemerkt dies leicht,

[1]) Vgl. Anmerkung S. 129.

wenn man auf dem Monochord zwei Saiten von verschiedener Dicke aufzieht, und ihre hohen Obertöne hervorzubringen sucht. Dies gelingt auf der dünneren viel besser als auf der dickeren. Um hohe Obertöne hervorzubringen, sind Saiten von ganz feinem Draht, wie ihn die Posamentiere zum Bespinnen brauchen, am vorteilhaftesten, und wenn man eine Anschlagsweise braucht, welche hohe Obertöne hervorzubringen geeignet ist, z. B. mit einem Metallstift die Saite schlägt oder reißt, hört man dies auch dem Klang an. Die vielen hohen Obertöne, die einander in der Skala sehr nahe liegen, geben nämlich das eigentümlich hohe, unharmonische Geräusch, welches wir mit dem Worte „Klimpern" zu bezeichnen pflegen. Vom achten Partialton an liegen diese Töne um weniger als eine ganze Tonstufe voneinander entfernt, vom 15. ab um weniger als eine halbe. Sie bilden deshalb eine enge Reihe dissonierender Töne. Auf einer Saite aus feinstem Eisendraht, wie er zur Verfertigung künstlicher Blumen gebraucht wird, von 700 cm Länge, konnte ich noch den 18. Ton isoliert hervorbringen. Die Eigentümlichkeit der Zitherklänge beruht auf der Anwesenheit solcher klimpernder hoher Obertöne; nur geht die Reihe der Obertöne bei ihnen nicht so weit hinauf, wie an dem genannten Eisendraht, weil ihre Saiten kürzer sind.

Die Darmsaiten sind bei gleicher Festigkeit viel leichter als Metallsaiten und geben deshalb höhere Töne. Der Unterschied ihres Klanges beruht teils hierauf, teils aber auch wohl auf der weniger vollkommenen Elastizität der Darmsaiten, wodurch ihre Töne, namentlich die hohen, schneller gedämpft werden. Der Klang gerissener Darmsaiten (Guitarre, Harfe) ist deshalb weniger klimpernd als der von Metallsaiten.

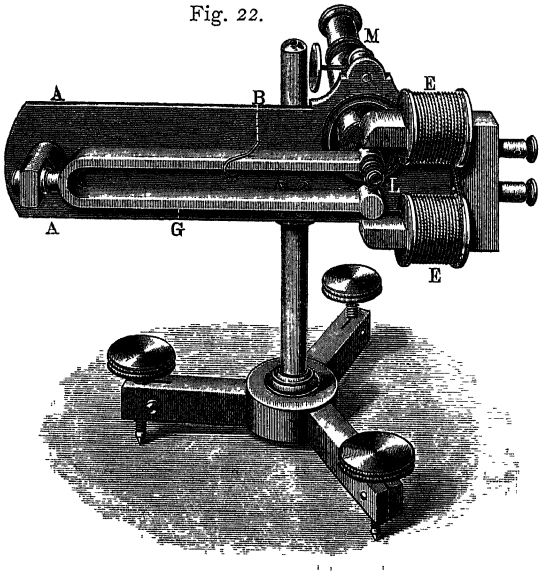
4. Klänge der Streichinstrumente.

Für die Bewegung der mit dem Violinbogen gestrichenen Saiten kann noch keine vollständige mechanische Theorie gegeben werden, weil man nicht weiß, in welcher Weise der Bogen auf die Bewegung der Saite einwirkt. Doch habe ich es möglich gefunden, mittels einer eigentümlichen, von dem französischen Physiker Lissajous in ihren Grundzügen vorgeschlagenen Methode, die Schwingungsform der einzelnen Punkte einer Violinsaite zu beobachten und aus der beeoachteten Schwingungsform, welche verhältnismäßig sehr einfach

ist, dann die ganze Bewegung der Saite und die Stärke ihrer Obertöne zu berechnen.

Man sehe durch eine Lupe, welche eine stark vergrößerte konvexe Glaslinse enthält, nach einem kleinen lichten Objekt, z. B. nach einem Stärkemehlkörnchen, welches das Licht einer Flamme reflektiert und als ein sehr feines Lichtpünktchen erscheint. Wenn man dann die Lupe auf und ab bewegt, während das lichte Pünktchen in Wirklichkeit ruhig an seinem Ort bleibt, so scheint dieses Pünktchen doch, durch die bewegte Lupe gesehen, selbst auf und ab zu schwanken. Eine solche Lupe *L* ist nun in dem Apparat, welchen ich angewendet habe, und der in Figur 22 dargestellt ist, am Ende einer Zinke der Stimmgabel *G* befestigt. Sie ist aus zwei achromatischen Glaslinsen zusammengesetzt, wie sie als Objektivgläser der Mikroskope gebraucht werden. Man benutzt diese beiden Linsen entweder allein, ohne sie noch mit anderen Linsen zu verbinden; oder wenn man eine stärkere Vergrößerung braucht, wird hinter der Metallplatte *A A*, welche die Stimmgabel trägt, die Röhre und das Okularstück *M* eines Mikroskopes angebracht, dessen Objektiv dann von den genannten Glaslinsen gebildet wird. Wenn man nun das Instrument, welches wir das Vibrationsmikroskop nennen können, so aufstellt, daß man durch dasselbe einen feststehenden lichten Punkt deutlich sieht, und dann die Gabel in Schwingung setzt, so wird von dieser das Linsensystem *L* periodisch auf und ab bewegt, und zwar in pendelartiger einfacher Schwingung. Für den Beobachter entsteht dadurch der Schein, als ob das Lichtpünktchen selbst sich auf und ab bewegte, und da die einzelnen Schwingungen so schnell

Fig. 22.



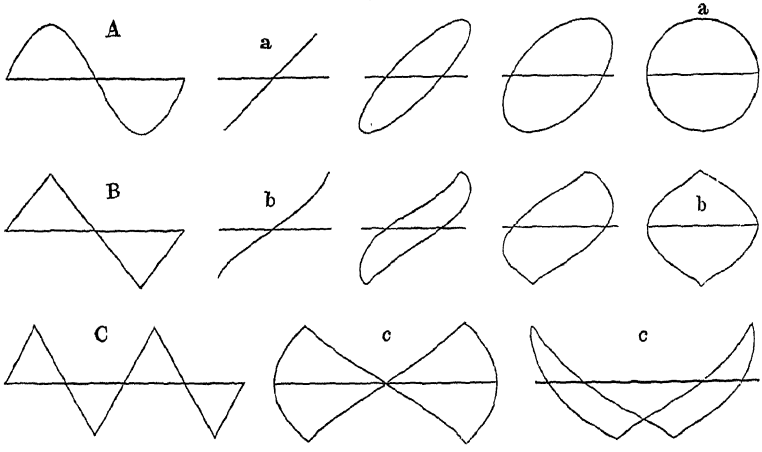
aufeinander folgen, daß der Eindruck des Lichtes im Auge während der Dauer einer Schwingung nicht erlöschen kann, so scheint der Weg des Lichtpünktchens als eine feststehende gerade Linie, welche um so länger ist, je größer die Exkursionen der Gabel sind [1]).

Das Stärkekörnchen nun, dessen Lichtreflex man wahrnimmt, wird an demjenigen tönenden Körper befestigt, dessen Schwingungsform man beobachten will, und dieser in solche Lage gebracht, daß das Körnchen horizontal hin und her schwingt, während das Linsensystem sich vertikal auf und ab bewegt. Wenn beide Arten von Bewegungen gleichzeitig vor sich gehen, erblickt der Beobachter den Lichtpunkt sowohl horizontal hin und her bewegt, entsprechend seiner wirklichen Bewegung, als auch scheinbar vertikal hin und her gehend wegen der Bewegung der Glaslinsen, und beide Arten von Verschiebungen setzen sich dann zusammen zu einer krummlinigen Bewegung. Dabei erscheint im Gesichtsfeld des Mikroskopes eine scheinbar ganz feststehende und unveränderliche helle Kurve, wenn entweder die Schwingungsperiode des Stärkekörnchens und die der Stimmgabel genau gleich sind, oder die eine genau zwei-, drei- oder viermal so groß ist als die andere, weil in diesem Falle der lichte Punkt nach einer oder einigen Schwingungen immer genau wieder dieselbe Bahn durchläuft, die er vorher durchlaufen hatte. Sind diese Verhältnisse der Schwingungszahlen nicht vollkommen genau getroffen, so verändern sich die Kurven langsam, und zwar sieht es täuschend so aus, als wären sie auf die Oberfläche eines durchsichtigen Zylinders gezeichnet, der sich langsam um seine Achse dreht. Eine solche langsame Verschiebung der gesehenen Kurven ist nicht unvorteilhaft, weil der Beobachter sie dann nacheinander in verschiedenen Lagen erblickt. Weicht aber das Verhältnis der Schwingungszahlen des beobachteten Körpers und der Gabel zu sehr von einem durch kleine ganze Zahlen darstellbaren Verhältnis ab, so geschieht die Bewegung der Kurven zu schnell, als daß das Auge ihnen folgen könnte, und es verwirrt sich dann alles.

[1]) Das Ende der zweiten Zinke der Stimmgabel ist verdickt und bildet ein Gegengewicht für die Lupe. Das eiserne Bügelchen *B*, welches auf die eine Zinke aufgeklemmt ist, dient dazu, die Tonhöhe der Gabel etwas zu verändern; wenn man es gegen das Ende der Zinke hinschiebt, wird ihr Ton tiefer. *E* ist ein Elektromagnet, mit dessen Hilfe man die Gabel dauernd in gleichmäßiger Schwingung erhalten kann, wenn man seine Drahtrollen von intermittierenden elektrischen Strömen durchfließen läßt, wie dies im sechsten Abschnitt näher beschrieben werden soll.

Soll das Vibrationsmikroskop zur Untersuchung der Bewegung einer Violinsaite benutzt werden, so muß man den Lichtpunkt an dieser anbringen. Zu dem Ende schwärzt man zunächst die betreffende Stelle der Saite mit Tinte, reibt sie, wenn sie trocken geworden ist, mit Klebwachs ein und pulvert etwas Stärkemehl über, so daß einige Körnchen haften bleiben. Die Violine wird dann dem Mikroskop gegenüber so befestigt, daß die Saiten vertikal stehen, und man durch das Mikroskop blickend den Lichtreflex eines der Stärkemehlkügelchen deutlich sieht. Den Bogen führt man den Zinken der Stimmgabel parallel über die Saite; dann schwingt jeder Punkt der Saite horizontal, und der Beobachter

Fig. 23.



sieht bei gleichzeitiger Bewegung der Stimmgabel die eigentümlichen Schwingungskurven. Zur Beobachtung habe ich die *a*-Saite der Violine benutzt, welche ich etwas höher, auf *b'*, stimmte, so daß sie gerade zwei Oktaven höher war als die Stimmgabel des Apparates, welche *B* gab.

In Fig. 23 sind Schwingungskurven abgebildet, wie sie durch das Vibrationsmikroskop erscheinen (jedoch wurden aus Gründen der Anschaulichkeit die Kurven um einen rechten Winkel gedreht). Die gerade Horizontallinie der Figuren *aa*, *bb* und *cc* stellt demnach die scheinbare Bahn des beobachteten Lichtpunktes dar, ehe er selbst in Schwingung versetzt ist, die Kurven und Zickzacklinien derselben Figuren dagegen die Bahn des Lichtpunktes, wenn er selbst ebenfalls schwingt. Daneben sind in *A*, *B*, *C* dieselben Schwingungsformen nach der im ersten und zweiten Abschnitt angewendeten Methode dargestellt, wobei die

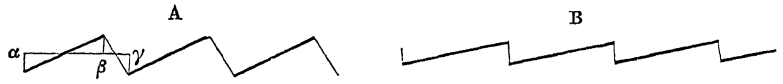
einzelnen Teile der horizontalen Grundlinie den entsprechenden Zeitteilen direkt proportional sind, während in den Figuren *aa*, *bb* und *cc* die horizontalen Längen den Exkursionen der schwingenden Linse proportional sind. *A* und *aa* stellen die Schwingungskurven für eine Stimmgabel dar, also eine einfache Schwingung, *B* und *bb* die des Mittelpunktes einer Violinsaite, welche mit der Gabel des Vibrationsmikroskopes im Einklang ist, *C* und *cc* dieselbe für eine Saite, die eine Oktave höher gestimmt ist. Man kann sich die Figuren *aa*, *bb* und *cc* aus den Figuren *A*, *B* und *C* gebildet denken, indem man die Fläche, auf welche die letzteren gezeichnet sind, um einen durchsichtigen Zylinder herumgelegt denkt, dessen Umfang gleich der horizontalen Grundlinie dieser Figuren ist. Die auf die Zylinderfläche gezeichnete Kurve werde dann aus einer solchen Stellung des Beobachters betrachtet, daß ihm die um den Zylinder zum Kreise zusammengeschlossene horizontale Grundlinie jener Figuren perspektivisch als einfache gerade Linie erscheint, dann wird ihm auch die Schwingungskurve *A* in der Form *aa*, *B* als *bb*, *C* als *cc* erscheinen. Wenn die Tonhöhe der beiden schwingenden Körper nicht in einem genauen harmonischen Verhältnis ist, sieht es so aus, als wenn dieser imaginäre Zylinder, auf den die Schwingungskurve gezeichnet ist, rotierte.

Es ist nun auch leicht, aus den Formen *aa*, *bb* und *cc* die *A*, *B*, *C* wiederzufinden, und da die letzteren ein verständlicheres Bild der Bewegung der Saite geben als die ersteren, werde ich im folgenden immer gleich die scheinbar auf eine Zylinderfläche gezeichnete Kurve so zeichnen, als wäre die Zylinderfläche wie in den Figuren *A*, *B* und *C* auf eine Ebene abgerollt. Dann entspricht der Sinn unserer Schwingungskurven ganz den in den früheren Abschnitten dargestellten ähnlichen Kurven. Wenn vier Schwingungen der Violinsaite auf eine Schwingung der Gabel kommen, wie das bei unseren Versuchen der Fall war, also vier Wellen rings um den Umfang des imaginären Zylinders aufgezeichnet erscheinen, und diese außerdem noch langsam rotieren und sich in verschiedenen Stellungen zeigen, so ist es gar nicht schwer, sie gleich auf die Ebene abgewickelt nachzuzeichnen; denn die mittleren Zacken erscheinen dann auf der Zylinderfläche ziemlich ebenso, als wären sie auf eine Ebene gezeichnet.

Die Figuren 23 *B* und *C* geben direkt die Schwingungsform für die Mitte einer Violinsaite, wenn der Bogen gut faßt und der Grund-

ton der Saite voll und kräftig zum Vorschein kommt. Man sieht leicht, daß diese Schwingungsform sich wesentlich unterscheidet von der in Fig. 23 *A* dargestellten Form einer einfachen Schwingung. Mehr gegen die Enden der Saite zu wird die Schwingungsfigur die nachstehende der Fig. 24 *A*, und zwar verhalten sich die beiden Abschnitte $\alpha\beta$ und $\beta\gamma$ je einer Welle zueinander, wie die beiden Stücke der Saite, welche zu beiden Seiten des beobachteten Punktes gelegen sind. In der Figur ist dieses Verhältnis 1:3, wie man es findet, wenn der beobachtete Punkt $^1/_4$ vom Ende der Saite entfernt liegt. Ganz gegen das Ende der Saiten hin wird die Form wie Fig. 24 *B*. Da die Geschwindigkeit des hellen Punktes in den kurzen Stücken der Figur sehr groß ist, so werden diese Teile so lichtschwach, daß

Fig. 24.



sie oft dem Auge entschwinden und nur die langen Linienstücke stehen bleiben.

Diese Figuren geben zu erkennen, daß jeder Punkt der Saite sich zwischen den Endpunkten einer Schwingung mit konstanter Geschwindigkeit hin und her bewegt. Für den Mittelpunkt ist die Geschwindigkeit, mit der er aufsteigt, gleich der, mit der er absteigt. Wird der Violinbogen nahe dem rechten Ende der Saite absteigend gebraucht, so ist auf der rechten Hälfte der Saite die Geschwindigkeit des Absteigens kleiner als die des Aufsteigens, desto mehr, je näher man dem Ende kommt. Auf der linken Hälfte der Saite ist es umgekehrt. An der Stelle, wo gestrichen wird, scheint die Geschwindigkeit des Absteigens der Geschwindigkeit des Violinbogens gleich zu sein. Während des größeren Teiles jeder Schwingung haftet hier die Saite an dem Violinbogen und wird von ihm mitgenommen; dann reißt sie sich plötzlich los und springt schnell zurück, um sogleich wieder von einem anderen Punkt des Bogens gefaßt und mitgenommen zu werden[1]).

[1]) Die hier beschriebenen Tatsachen genügen, um die Bewegung der gestrichenen Saite vollständig festzustellen. Siehe Beilage Nr. VI. Eine neue viel einfachere Methode, die Schwingungsform der Violine zu beobachten, ist von Herrn Clem. Neumann angegeben in Sitzungsber. d. k. k. Akademie zu Wien, Math.-naturw.

Für unseren gegenwärtigen Zweck kommt es nun namentlich auf die Bestimmung der Obertöne an. Da wir die Schwingungsform der einzelnen Punkte der Saite kennen, so läßt sich aus ihr die Intensität der einzelnen Obertöne vollständig berechnen. Die mathematischen Formeln für diese Rechnung sind in der Beilage entwickelt. Die Rechnung selbst ergibt folgendes. Es sind bei guter Ansprache der gestrichenen Saite alle Obertöne auf ihr vorhanden, welche bei dem bestehenden Grade von Steifigkeit der Saite überhaupt sich bilden können, und zwar nach der Höhe hin in abnehmender Stärke. Die Schwingungsweite sowohl als die Intensität des zweiten Tones ist $^1/_4$ von der des Grundtones, die des dritten Tones $^1/_9$, die des vierten $^1/_{16}$ usw. Es ist dies dasselbe Verhältnis in der Stärke der Obertöne wie bei einer Saite, die man in ihrer Mitte durch Reißen in Bewegung gesetzt hat, nur daß bei letzterer die geradzahligen Töne alle fehlen, welche im Gegenteil durch die Anwendung des Bogens mit hervorgerufen werden. Übrigens hört man die Obertöne im Klang der Violine sehr leicht und stark, namentlich wenn man sie sich vorher als Flageolettöne auf der Saite angegeben hat. Letzteres erreicht man bekanntlich dadurch, daß man die Saite streicht, während man sie in einem Knotenpunkt des gewünschten Tones mit dem Finger leise berührt. Bis zum sechsten Oberton sprechen die Saiten der Violine leicht an, mit einiger Mühe bringt man es auch bis zum zehnten Oberton. Die tieferen Töne sprechen am besten an, wenn man die Saite um $^1/_{10}$ bis $^1/_{12}$ der Länge einer schwingenden Abteilung von ihrem Ende entfernt streicht; für die höheren Töne, wo die schwingenden Abteilungen kleiner werden, muß man etwa $^1/_4$ bis $^1/_6$ ihrer Länge vom Ende entfernt streichen.

Der Grundton ist im Klang der Streichinstrumente verhältnismäßig kräftiger, als in den nahe ihren Enden geschlagenen oder gerissenen Saiten des Klaviers und der Guitarre; die ersten Obertöne sind verhältnismäßig schwächer; dagegen sind die höheren Obertöne vom sechsten bis etwa zehnten hin viel deutlicher und verursachen die Schärfe des Klanges der Streichinstrumente.

Kl. 61, 89. Er hat am Bogen selbst kammförmig gestellte Drähte befestigt. Blickt man zwischen diesen hindurch nach der Saite, so sieht man ein System von Zickzacklinien aus geradlinigen Teilen zusammengesetzt. Die Schlüsse auf die Bewegungsart der Saite stimmen mit den oben erhaltenen Ergebnissen.

Die im vorigen beschriebene Grundform der Schwingungen von Violinsaiten ist wenigstens in ihren wesentlichen Zügen ziemlich unabhängig von der Stelle, wo die Saite gestrichen wird, wenn nur überhaupt die Saite gut anspricht; sie verändert sich durchaus nicht in der Weise, wie die Schwingungsform einer gerissenen oder geschlagenen Saite nach der Stelle des Anschlages sich ändert. Doch machen sich kleine Unterschiede in der Schwingungsfigur bemerklich, welche von der Stelle des Streichens abhängen. Gewöhnlich zeigen nämlich die Linien der Schwingungsfigur kleine Kräuselungen wie in Fig. 25, deren Zacken an Breite und Höhe zunehmen, je mehr sich der Bogen vom Ende der Saite entfernt. Wenn man in einem dem Steg benachbarten Knotenpunkt eines der hohen Obertöne die Saite anstreicht, so lassen sich diese Kräuselungen einfach darauf reduzieren,

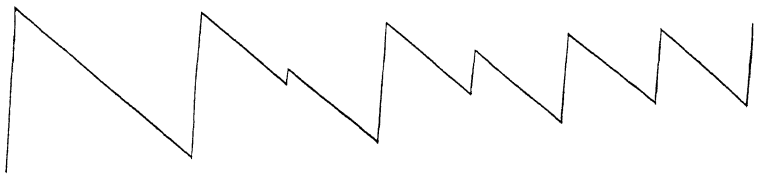
Fig. 25.



daß von der bisher beschriebenen normalen Saitenbewegung alle diejenigen Töne wegfallen, welche in dem gestrichenen Punkt einen Knotenpunkt haben. Wenn die Beobachtung der Schwingungsform in einem der übrigen zugehörigen Knotenpunkte des tiefsten ausfallenden Tones angestellt wird, sieht man nichts von jenen Kräuselungen. Also wenn man z. B. $^1/_7$ der Saitenlänge vom Steg entfernt streicht, und in $^6/_7$ oder $^5/_7$ oder $^4/_7$ usw. beobachtet, ist die Schwingungsfigur einfach wie in Fig. 24; wenn man aber zwischen je zwei Knotenpunkten beobachtet, erscheinen die Kräuselungen wie in Fig. 25. Veränderungen in der Klangfarbe des Tones hängen zum Teil von diesem Umstand ab. Nähert man sich beim Streichen zu sehr dem Griffbrett, dessen Ende um $^1/_5$ der Saitenlänge vom Steg entfernt ist, so fehlt in dem Klang der Saite der fünfte oder sechste Ton, welche beide sonst noch deutlich hörbar zu sein pflegen. Der Klang wird dadurch etwas dumpfer. Die gewöhnliche Stelle für das Anstreichen liegt etwa in $^1/_{10}$ der Saitenlänge, wird im Piano etwas entfernter vom Steg, im Forte etwas näher genommen. Nähert man sich mit

dem Bogen dem Steg, indem man ihn nur leicht andrückt, so geht eine andere Veränderung des Klanges vor, die sich in der Schwingungsfigur leicht zu erkennen gibt. Es entsteht nämlich ein Gemisch aus dem Grundton und dem ersten Flageoletton der Saite. Bei leichtem und schnellem Streichen an einer um etwa $^1/_{20}$ der Saitenlänge vom Steg entfernten Stelle erhält man nämlich zuweilen die höhere Oktave des Grundtones allein, indem in der Mitte der Saite ein Knotenpunkt entsteht; bei fester angedrücktem Bogen erklingt zugleich der Grundton. Dazwischen kann sich nun die höhere Oktave in jedem Verhältnis einmischen. In der Schwingungsfigur gibt sich dies gleich zu erkennen. Fig. 26 stellt die Reihenfolge der Formen bei dieser Veränderung dar. Man sieht, wie aus der längeren Saite eines Wellenberges sich eine neue Spitze zuerst wenig, dann stärker

Fig. 26.



erhebt, bis die neuen Bergspitzen so hoch wie die früheren werden, wobei die Schwingungszahl des Tones sich verdoppelt hat und seine Höhe in die Oktave übergegangen ist. Die Klangfarbe des tiefsten Klanges der Saite wird durch die beginnende Einmischung des ersten Obertones zarter und heller, aber weniger voll und kräftig. Es ist übrigens ein sehr interessantes Schauspiel, die Schwingungsfigur zu beobachten, während man kleine Veränderungen in der Bogenführung vor sich gehen läßt, und dabei wahrzunehmen, wie leise Veränderungen in der Klangfarbe sich immer gleich durch sehr merkliche Veränderungen der Schwingungsfigur zu erkennen geben.

Die bisher beschriebenen Schwingungsformen können bei einer recht gleichmäßigen Bogenführung auch gleichmäßig ruhig und unverändert erhalten werden, dabei gibt das Instrument einen ununterbrochenen reinen musikalischen Klang. Jedes Kratzen des Bogens gibt sich dagegen durch plötzliche und sprungweise eintretende Verschiebungen und Veränderungen der Schwingungsform zu erkennen. Ist das Kratzen anhaltend, so hat das Auge gar nicht Zeit, eine

regelmäßige Figur aufzufassen. Die kratzenden Geräusche des Violinbogens sind also als unregelmäßige Unterbrechungen der normalen Saitenschwingungen zu betrachten, worauf die letzteren von neuem und mit neuem Anfangspunkt einsetzen. An der Schwingungsfigur sind übrigens alle kleinsten Anstöße des Bogens, die das Ohr kaum bemerkt, durch schnelle Sprünge bezeichnet. Durch die Häufigkeit solcher kleiner und großer Störungen der regelmäßigen Schwingungen scheinen sich nun namentlich die schlechten Streichinstrumente von den guten zu unterscheiden. Auf einer Saite meines Monochords, das eben nur gelegentlich hierbei als Streichinstrument gebraucht wurde, war eine große Sauberkeit des Striches nötig, um nur für so kurze Zeit eine ruhige Schwingungsfigur zu erhalten, daß man sie mit dem Auge eben noch auffassen konnte; der Klang war übrigens rauh und das Kratzen sehr häufig. Bei einer sehr guten neueren Violine von Bausch war es dagegen leichter, die Schwingungsfigur einige Zeit ruhig zu halten, und noch viel besser gelang es mir an einer alten italienischen Violine von Guadanini; erst an dieser hatte ich die Schwingungsfigur so ruhig, daß ich die kleinen Kräuselungen zählen konnte. Diese große Gleichmäßigkeit der Schwingungen ist offenbar der Grund des reineren Tones dieser älteren Instrumente, da jede kleine Unregelmäßigkeit sich sogleich dem Ohr als etwas Rauhes oder Kratzendes des Tones zu erkennen gibt.

Es kommt hierbei wahrscheinlich darauf an, daß der Bau des Instrumentes und eine möglichst vollkommene Elastizität des Holzes sehr regelmäßige Saitenschwingungen ermöglicht; sind solche einmal eingeleitet, so wird auch der Bogen leicht regelmäßig wirken. Dadurch wird der reine, von allen Rauhigkeiten freie Abfluß des Tones bedingt. Andererseits kann aber bei solcher Regelmäßigkeit der Schwingungen die gestrichene Saite mit größerer Kraft in Anspruch genommen werden; die guten Instrumente erlauben deshalb eine kräftigere Bewegung der Saiten, und die ganze Intensität ihres Tones wird ohne Verlust der Luft mitgeteilt, während jede Unvollkommenheit in der Elastizität des Holzes einen Teil der Bewegung durch Reibung verloren gehen läßt. Ein guter Teil der Vorzüge der alten Violinen möchte aber wohl eben auf ihrem Alter und namentlich dem langen Gebrauch beruhen, welche beide auf die Elastizität des Holzes nur günstig einwirken können. Mehr als auf alles andere

kommt es aber offenbar auf die Kunst der Bogenführung an; wie fein diese ausgebildet sein muß, um einen möglichst vollkommenen Klang und dessen verschiedene Abarten sicher zu erhalten, davon kann man sich durch nichts besser überzeugen, als durch Beobachtung der Schwingungsfiguren. Auch ist es bekannt, daß ausgezeichnete Spieler selbst aus mittelmäßigen Instrumenten einen vollen Ton hervorlocken.

Die bisher mitgeteilten Beobachtungen und Schlüsse beziehen sich allein auf die Schwingungen der Saiten des Instrumentes und die Stärke der Obertöne, insofern sie in der zusammengesetzten Schwingungsbewegung der Saiten enthalten sind. Die Töne verschiedener Höhe gehen aber nicht gleich gut an die Luft über und treffen also auch das Ohr des Hörers nicht genau in demselben Verhältnis der Stärke, welches ihnen in der Bewegung der Saite zukommt. Die Überleitung an die Luft geschieht durch den resonierenden Körper des Instrumentes; unmittelbar teilen schwingende Saiten der Luft keinen merklichen Teil ihrer Bewegung mit, wie ich schon vorher bemerkt habe. Die schwingenden Saiten der Violine erschüttern zunächst den Steg, über den sie hingezogen sind. Dieser steht mit zwei Füßchen auf dem zwischen den Schallöchern gelegenen beweglichsten Teil der Decke des Hohlkörpers. Der eine Fuß des Steges ruht auf einer relativ festen Unterlage, nämlich auf dem sogenannten Stimmstock, einem festen Stäbchen, welches zwischen der oberen und unteren Platte des Körpers eingefügt ist. Der andere Fuß des Steges allein ist es, welcher die elastischen Holzplatten und mittels deren Hilfe die innere Luftmasse des Körpers erschüttert.

Ein Luftraum, welcher, wie der der Violine, Bratsche und des Violoncello, durch elastische Holzplatten abgegrenzt ist, hat gewisse Eigentöne, welche man durch Anblasen der Schallöffnungen des Kastens hervorrufen kann. Die Violine gibt, in dieser Weise angeblasen, den Ton *c'* nach Savart, welcher Instrumente von Stradivario untersuchte; denselben Ton fand Zamminer konstant auch bei ziemlich mangelhaften Instrumenten wieder. Für das Violoncell fand Savart durch Anblasen *F*, Zamminer *G*. Der Kasten der Bratsche ist nach des letzteren Rechnung einen Ton tiefer gestimmt als der der Violine. Wenn man das Ohr fest an die Rückseite des Kastens einer Violine anlegt und auf einem Klavier die Tonleiter spielt, findet man ebenfalls, daß einige Töne, durch die Resonanz des

Instrumentes verstärkt, in das Ohr dringen. Bei einer Violine von Bausch traten auf diese Weise namentlich zwei Töne stärkster Resonanz hervor, nämlich $c' - cis'$ und $a' - b'$; bei einer Bratsche fand ich übereinstimmend mit Zamminers Rechnung beide etwa um eine ganze Tonstufe tiefer liegend.

Die Folge dieser eigentümlichen Resonanzverhältnisse ist, daß diejenigen Töne der Saiten, welche den eigenen Tönen der Luftmasse nahe liegen, verhältnismäßig stärker hervortreten müssen. Man bemerkt dies auch sowohl auf der Violine wie auf dem Cello deutlich, wenigstens für den tiefsten Eigenton, wenn man die entsprechenden Noten auf den Saiten hervorbringt. Sie klingen besonders voll, und der Grundton dieser Klänge tritt besonders stark heraus. In schwächerem Grade meine ich dasselbe auch für das a' der Violine, welches ihrem höheren Eigenton entspricht, gehört zu haben.

Da der tiefste Ton der Violine g ist, so können von den Obertönen ihrer Klänge nur die höheren Oktaven ihrer drei tiefsten Noten durch die Resonanz des höheren Eigentones ihres Luftraumes etwas verstärkt werden, im allgemeinen müssen dagegen die Grundtöne, namentlich ihrer höheren Noten, den Obertönen gegenüber begünstigt werden, weil die genannten Grundtöne den eigenen Tönen der Luftmasse näher liegen als die Obertöne. Es wird dadurch eine ähnliche Wirkung wie am Klavier hervorgebracht, wo ebenfalls durch die Konstruktion der Hämmer die Obertöne der tiefen Noten begünstigt die der höheren geschwächt sind. Beim Cello, dessen tiefste Saite C gibt, liegt der stärkere Eigenton der Luftmasse ebenso wie bei der Violine eine Quarte bis Quinte höher als der der tiefsten Saite. Es entsteht dadurch ein ähnliches Verhältnis der begünstigten und nicht begünstigten Töne, aber alles eine Duodezime tiefer. Bei der Bratsche dagegen liegen die am meisten begünstigten Töne, etwa dem h' entsprechend, nicht zwischen denen der ersten und zweiten Saite, sondern zwischen der zweiten und dritten, was mit der veränderten Klangfarbe dieses Instrumentes zusammenzuhängen scheint. In Ziffern läßt sich dieser Einfluß leider noch nicht ausdrücken. Sehr stark ist das Maximum der Resonanz für die eigenen Töne der Luftmasse nicht gerade ausgesprochen; es würde auch sonst eine viel größere Ungleichartigkeit in der Tonleiter der genannten Streichinstrumente hervorrufen, sobald man den Teil der Skala passierte, in welchem die

eigenen Töne ihrer Luftmassen liegen. Demgemäß ist zu vermuten, daß auch der Einfluß auf die relative Stärke der einzelnen Partialtöne der Klänge dieser Instrumente nicht sehr hervortretend ist.

5. Klänge der Flötenpfeifen.

Bei den in diese Klasse gehörigen Instrumenten wird der Ton hervorgebracht dadurch, daß man einen Luftstrom gegen die meist mit scharfen Rändern versehene Öffnung eines mit Luft gefüllten Hohlraumes treibt. Es gehören hierher außer den schon im vorigen Abschnitt erwähnten und in Fig. 20 abgebildeten Flaschen hauptsächlich die Flöten und der größte Teil der Orgelpfeifen. Bei den Flöten ist die tönende Luftmasse in der zylindrischen Bohrung ihres Körpers eingeschlossen; das Anblasen geschieht mit dem Munde gegen die etwas zugeschärften Ränder ihrer Mundöffnung. Die Konstruktion der Orgelpfeifen wird durch die nebenstehenden beiden Figuren versinnlicht. Fig. 27 *A* stellt eine hölzerne viereckige Pfeife der Länge nach durchschnitten dar, *B* die äußere Ansicht einer runden zinnernen Pfeife. *RR* bezeichnet in beiden die Röhre, welche die tönende Luftmasse einschließt, *ab* die nach oben durch eine scharfe Lippe begrenzte Mundöffnung, an welcher die Pfeife angeblasen wird. In Fig. 27 *A* sieht man bei *K* die Luftkammer, in welche die Luft aus dem Blasebalg zunächst eingetrieben wird; aus ihr kann die Luft nur durch den engen Spalt *cd* entweichen und wird hier gerade gegen die Schärfe der Lippe getrieben. Die dargestellte hölzerne Pfeife *A* ist oben offen; sie gibt einen Ton, dessen Welle in der Luft doppelt so lang ist, als die Länge des Rohres *RR*. Die andere Pfeife *B* ist eine gedackte, d. h. ihr oberes Ende ist geschlossen. Sie gibt einen

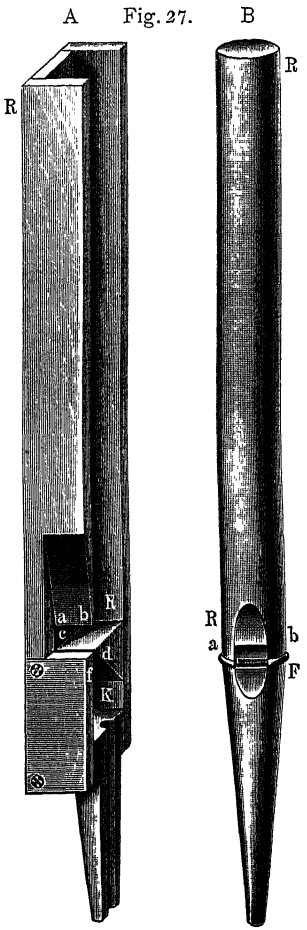


Fig. 27.

Ton, dessen Welle viermal so lang ist, als die Länge des Rohres *RR*, und der deshalb eine Oktave tiefer ist, als der einer gleich langen offenen Pfeife.

Ebenso wie solche Pfeifen, wie die Flöten, die beschriebenen Flaschen, die Luftkästen der Violinen, kann man nun aber auch überhaupt alle mit einer hinreichend engen Öffnung versehenen lufthaltigen Hohlräume zum Tönen bringen, wenn man einen schmalen bandförmigen Luftstrom über ihre Öffnung hingehen läßt, vorausgesetzt, daß diese Öffnung mit einigermaßen hervortretenden und kantigen Rändern versehen ist.

Die Luftbewegung, welche im Inneren der Orgelpfeifen eintritt, entspricht einem System ebener Wellen, welche zwischen den beiden Enden der Pfeife hin und her geworfen werden. An dem geschlossenen Ende einer zylindrischen gedackten Pfeife ist die Zurückwerfung jeder gegen dasselbe andringenden Welle eine sehr vollständige, so daß die zurückgeworfene Welle dieselbe Intensität hat, wie vor der Zurückwerfung. Da in jedem nach einer Richtung fortlaufenden Wellenzuge die Geschwindigkeit der oszillierenden Teilchen in den verdichteten Stellen der Welle gleich gerichtet, in den verdünnten Stellen entgegengesetzt gerichtet ist der Richtung der Fortpflanzung der Wellen, und da an dem geschlossenen Ende der Pfeife die Deckplatte keine Bewegung der Luftteilchen in Richtung der Pfeifenlänge zustande kommen läßt, so kombinieren sich die ankommende und zurückgeworfene Welle dort so, daß sie beide entgegengesetzte Oszillationsgeschwindigkeit der Luftteilchen hervorrufen und daher bei ihrer Superposition die Geschwindigkeit der Luftteilchen an der Scheidewand gleich Null machen. Daraus folgt, daß die Phasen des Druckes in beiden immer übereinstimmend sind, da entgegengesetzte Oszillationsbewegung und entgegengesetzte Fortpflanzung übereinstimmenden Druck geben.

An geschlossenen Enden also ist keine Bewegung, aber starker Druckwechsel. Die Reflexion der Welle geschieht so, daß die Phase der Verdichtung ungeändert bleibt, aber die Richtung der Oszillationsbewegung umgekehrt wird.

Umgekehrt ist es an den offenen Enden der Pfeifen, zu denen auch die Anblaseöffnungen ihrer Mundstücke zu rechnen sind. An einem offenen Ende, wo die Luft der Röhre frei mit der großen

äußeren Luftmasse kommuniziert, kann keine erhebliche Verdichtung eintreten. Bei der gewöhnlich gegebenen Erklärung der Luftbewegung in den Pfeifen setzt man voraus, daß die Verdichtung und Verdünnung an den offenen Enden der Pfeifen gleich Null sei, was annähernd, aber nicht genau richtig ist. Wäre der Dichtigkeitswechsel daselbst genau gleich Null, so würde auch an den offenen Enden eine vollständige Reflexion jeder ankommenden Welle stattfinden, indem eine gleich große zurückgeworfene Welle entstände mit entgegengesetzter Dichtigkeitsänderung, wobei die Oszillationsrichtung der Luftteilchen aber in beiden Wellen übereinstimmend sein würde. Die Superposition einer solchen ankommenden und zurückgeworfenen Welle von entgegengesetzten Dichtigkeitsphasen würde am offenen Ende in der Tat die Dichtigkeit ungeändert lassen, dagegen große Geschwindigkeit der schwingenden Luftteilchen geben.

In der Tat erklärt die gemachte Annahme die wesentlichen Erscheinungen der Orgelpfeifen. Betrachten wir zunächst eine Pfeife mit zwei offenen Enden. Erregen wir an einem Ende derselben eine Verdichtungswelle, so läuft diese vorwärts bis zum anderen Ende, wird hier als Verdünnungswelle reflektiert, läuft zurück zum ersten Ende, wird hier mit wieder gewechselter Phase als Verdichtungswelle reflektiert und wiederholt nun den eben gemachten Weg in derselben Weise zum zweiten Male. Diese Wiederholung desselben Vorganges tritt also ein, nachdem die Welle in der Röhre einmal hin und einmal her, d. h. zweimal durch die ganze Länge der Röhre gelaufen ist. Die Zeit, die dazu gebraucht wird, ist gleich der doppelten Röhrenlänge dividiert durch die Schallgeschwindigkeit. Dies ist die Schwingungsdauer des tiefsten Tones, den die Röhre geben kann.

Wenn nun um die Zeit, wo die Welle ihren zweiten Hin- und Hergang beginnt, ein zweiter gleichgerichteter Anstoß, z. B. durch eine schwingende Stimmgabel, gegeben wird, so erfährt die Luftbewegung dadurch eine Verstärkung, die fortdauernd zunehmen wird, wenn die neuen Anstöße fortdauernd in demselben Rhythmus wie der Hin- und Hergang der Wellen erfolgen.

Aber auch wenn die zurückgekehrte Welle nicht mit dem ersten folgenden gleichartigen Anstoß der Stimmgabel zusammentrifft, sondern mit dem zweiten oder dritten oder vierten usw., wird die Luftbewegung nach jedem Hin- und Hergang verstärkt werden.

Ein an beiden Enden offenes Rohr wird also als Resonator dienen können für Töne, deren Schwingungszahl gleich ist der Schallgeschwindigkeit (332 m) dividiert durch die doppelte Röhrenlänge, oder zweimal oder dreimal so groß, oder überhaupt ein ganzes Vielfache jener Zahl. Das heißt, die Töne stärkster Resonanz eines solchen Rohres werden, wie bei den Saiten, die vollständige Reihe der harmonischen Obertöne seines Grundtones darstellen.

Etwas anders stellt es sich bei den an einem Ende gedackten Pfeifen. Erregen wir am offenen Ende, etwa durch eine schwingende Stimmgabel, einen Verdichtungsstoß, der sich in die Röhre hinein fortpflanzt, so läuft dieser gegen das geschlossene Ende, wird hier als Verdichtungsstoß reflektiert, kommt zurück, wird nun am offenen Ende mit geänderter Phase als Verdünnungswelle reflektiert, und erst, wenn er nochmals am geschlossenen Ende mit gleicher Phase und dann nochmals am offenen Ende mit wieder geänderter Phase als Verdichtungsstoß reflektiert ist, tritt eine Wiederholung des bisherigen Vorganges ein, also erst, nachdem die Welle viermal die Länge der Pfeife durchlaufen hat. Der Grundton einer gedackten Pfeife hat also eine doppelt so große Schwingungsdauer, als der einer gleich langen offenen Pfeife. Das heißt, ersterer ist die tiefere Oktave des letzteren. Wiederholt sich nun nach diesem doppelten Hin- und Hergang der erste Anstoß in gleicher Weise, so entsteht verstärkte Resonanz.

Auch können Obertöne des Grundtones verstärkt werden, aber nur die ungeradzahligen. Da nämlich nach Ablauf der halben Schwingungsdauer des Grundtones die Welle in der Röhre mit entgegengesetzter Dichtigkeitsphase ihren Weg erneuert, so können nur solche Töne verstärkt werden, die nach Ablauf der halben Schwingungsdauer des Grundtones die entgegengesetzte Phase geben. Der zweite Ton hat aber nach dieser Zeit eine ganze Schwingung zurückgelegt, der vierte zwei ganze Schwingungen usw. Diese geben also die gleiche Phase und heben an der entgegengesetzt wiederkehrenden Welle ihre frühere Wirkung auf.

Die Töne starker Resonanz in den gedackten Pfeifen entsprechen also der Reihe der ungeradzahligen Partialtöne des Grundtones. Bezeichnen wir dessen Schwingungszahl mit n, so ist $3n$ die Duodezime, d. h. die Quinte der höheren Oktave $2n$, $5n$ die große Terz der zweiten Oktave $4n$, $7n$ die kleine Septime derselben Oktave usw.

Obgleich nun aber in der Hauptsache die Erscheinungen diesen Regeln folgen, so treten doch gewisse Abweichungen deshalb ein, weil an den offenen Enden der Pfeifen in der Tat der Druckwechsel nicht vollständig gleich Null ist. Von ihnen aus teilt sich nämlich die Schallbewegung der freien Luft mit, und die von der Röhrenmündung aus sich verbreitenden Wellen haben zwar verhältnismäßig geringen Druckwechsel, doch fehlt derselbe nicht ganz. Ein Teil einer jeden im Rohr gegen das offene Ende laufenden Welle wird also nicht reflektiert, sondern läuft hinaus in das Freie, während der größere Rest reflektiert wird und im Rohr zurückläuft. Die Reflexion ist desto vollständiger, je kleiner die Dimensionen der Öffnung im Vergleich zur Wellenlänge des betreffenden Tones sind.

Auch zeigt weiter die Theorie[1]) mit dem Versuch übereinstimmend, daß die Phasen des reflektierten Teiles der Welle von der Art sind, als wäre die Reflexion nicht an der Fläche der Mündung, sondern an einer etwas davon verschiedenen Ebene geschehen. Die den Tonhöhen entsprechende Pfeifenlänge, welche wir die reduzierte Länge der Pfeife nennen können, ist also von der wahren Länge etwas verschieden, der Unterschied zwischen beiden übrigens von der Form der Mündung abhängig. Die Tonhöhe gewinnt darauf erst Einfluß, wenn die Wellenlängen so kurz werden, daß man im Verhältnis zu ihnen die Dimensionen der Öffnung nicht mehr vernachlässigen kann.

Bei zylindrischen Röhren von kreisförmigem Querschnitt und rechtwinkelig abgeschnittener Grenzkante liegt nach der theoretischen Bestimmung die Reflexionsebene außerhalb der Pfeife um 0,7854 des Radius des Kreises von ihr entfernt. An einer hölzernen Röhre von quadratischem Querschnitt, deren Seitenflächen innen 36 mm breit waren, fand ich die genannte Entfernung zu 14 mm[2]).

---

[1]) Siehe Crelles Journ. f. Mathem. 57; (v. Helmholtz, Wiss. Abh. 1, 303).

[2]) Die Pfeife war eine offene hölzerne, von Marloye konstruiert und mit einem Ansatzstück von 302 mm Länge versehen, dessen Länge genau der halben Wellenlänge der Pfeife entsprach. Bestimmt wurde die Lage der Knotenfläche im Inneren der Pfeife dadurch, daß man ein die Höhlung ganz ausfüllendes hölzernes Prisma vom offenen Ende der Pfeife aus soweit hineinschob, bis der Ton der nunmehr gedackten Pfeife genau derselbe war, wie der der offenen ohne den Stempel. Die Knotenfläche lag 137 mm vom Ende der Pfeife entfernt, während eine Viertelwellenlänge 151 mm beträgt. An der Anblaseöffnung dagegen fehlten 83 mm an der theoretischen Länge der Pfeife.

Da nun wegen der unvollkommenen Reflexion der Wellen an den offenen Enden der Orgelpfeifen bzw. an deren Anblaseöffnung, bei jeder Schwingung ein Teil der Luftbewegung an den Außenraum abgegeben wird, so muß eine oszillierende Bewegung ihrer Luftmasse schnell erschöpft werden, wenn keine Kräfte da sind, die die verlorene Bewegung wieder ersetzen. In der Tat ist ein Nachklingen der Orgelpfeifen, wenn man aufhört zu blasen, kaum zu bemerken. Indessen wird immerhin die Welle so oft in ihnen hin und her geworfen, daß man durch Klopfen gegen die Pfeife die Tonhöhe derselben wahrnehmbar machen kann.

Das gewöhnlich gebrauchte Mittel, sie in dauernder Tönung zu erhalten, ist das Anblasen. Um die Wirkung dieses Verfahrens zu verstehen, muß man berücksichtigen, daß wenn Luft aus einem solchen Spalt, wie er sich unterhalb der Lippe der Pfeife befindet, herausgeblasen wird, sie in einer blattförmigen Schicht die ruhende zunächst vor dem Spalt liegende Luftmasse durchbricht und dabei im Anfang keinen merklichen Teil der letzteren in ihre Bewegung mit hineinzieht. Erst in der Entfernung von einigen Zentimetern löst sich die strömende Schicht in Wirbel auf, welche eine Vermischung der bewegten und ruhenden Luft bewirken. Man kann diese blattförmige Schicht bewegter Luft sichtbar machen, wenn man durch ein Pfeifenmundstück ohne Pfeife, wie sie sich in physikalischen Sammlungen gewöhnlich vorfinden, einen mit Rauch oder Salmiaknebeln geschwängerten Luftstrom treibt. Jede aus einem Spaltbrenner brennende blattförmige Gasflamme ist übrigens ein Beispiel eines ähnlichen Vorganges. In ihr werden durch den Verbrennungsprozeß die Grenzen zwischen der hervorströmenden Gasschicht und der atmosphärischen Luft sichtbar gemacht. Nur macht die Flamme nicht auch die Fortsetzung des Stromes sichtbar.

Wie nun eine solche Gasflamme von jedem Luftstrom, der ihre Fläche trifft, fortgeweht und gegen die eine oder andere Seite geneigt wird, so auch der blattförmige Luftstrom an der Mündung einer Orgelpfeife. Die Folge davon ist, daß zur Zeit, wo die Oszillation der in der Pfeife enthaltenen Luftmasse die Luft durch die Enden der Pfeife eintreten macht, auch der blattförmige Luftstrom des Mundstückes nach innen geneigt wird und nun seine ganze Luftmenge in das Innere der Pfeife treibt. Während der entgegengesetzten Schwin-

gungsphase dagegen, wo die Luft durch die Enden der Pfeife austritt, wird auch das Luftblatt seine ganze Masse nach außen werfen. Dadurch wird nun bewirkt, daß gerade zu den Zeiten, wo die Luft in der Pfeife am meisten verdichtet ist, noch mehr Luft vom Gebläse hineingetrieben und die Verdichtung, also auch das Arbeitsäquivalent der Luftschwingungen vergrößert wird, während in den Zeiten der Verdünnung in der Pfeife der Wind des Gebläses seine Luftmassen in den offenen Raum vor der Pfeife entleert. Es kommt dabei in Betracht, daß der blattförmige Luftstrom Zeit braucht, um die Breite der Mündung der Pfeife zu passieren, während dieser Zeit der Einwirkung der schwingenden Luftsäule ausgesetzt ist und erst am Ende dieser Zeit an die Lippe gelangt, wo die beiden Wege nach außen und innen sich scheiden. Jedes hinzugeblasene Luftteilchen trifft also im Inneren der Pfeife eine etwas spätere Phase der Schwingung als die war, der es bei seinem Wege über die Öffnung ausgesetzt war. War die letztere Bewegung nach innen, so trifft es im Inneren der Pfeife auf die hierauf folgende Verdichtung usw.

Diese Art der Tonerregung bedingt nun auch die besondere Klangfarbe der Orgelpfeifen. Wir können den blattförmigen Luftstrom als sehr dünn im Vergleich zur Amplitude der Luftschwingungen betrachten. Letztere beträgt in der Mundöffnung oft 10 bis 16 mm, wie man durch kleine Gasflammen, die man dieser Öffnung nähert, erkennen kann. Es wird deshalb der Wechsel zwischen den Zeitperioden, wo die ganze hinzugeblasene Luft in das Innere der Pfeife, und denen, wo sie nach außen entleert wird, ziemlich plötzlich und fast momentan sein. Daraus folgt dann [1]), daß die durch Anblasen erzeugten Oszillationen ähnlicher Art sind, daß nämlich während eines gewissen Teiles jeder Schwingung die Geschwindigkeit der Luftteilchen in der Mündung und im freien Raum einen konstanten, nach außen gerichteten Wert habe, während eines zweiten Teiles einen konstanten nach innen gerichteten; und zwar wird bei kräftigem Anblasen im allgemeinen die nach innen gerichtete intensiver sein und kürzere Dauer haben; bei schwächerem Anblasen kann es umgekehrt sein. Ferner wird ebenso der Druck in der bewegten Luftmasse der Pfeife zwischen zwei konstanten Werten ziemlich plötzlich wechseln müssen. Die Plötzlich-

[1]) Siehe Beilage VII.

keit dieses Überganges wird nun allerdings dadurch gemäßigt, daß der blattförmige Luftstrom nicht unendlich dünn ist, sondern eine kurze Zeit gebraucht, um an der Lippe der Pfeife vorüberzugehen, und daß zweitens die höheren Obertöne, deren Wellenlängen den Durchmesser der Pfeife nur in mäßigem Verhältnis übertreffen, sich überhaupt unvollkommen ausbilden.

Die Art der Luftbewegung, die hier beschrieben ist, ist genau dieselbe, wie die in den Fig. 23*B* und *C*, Fig. 24*A* und *B* dargestellte der schwingenden Punkte einer Violinsaite, und daß die Orgelbauer diese Ähnlichkeit des Klanges längst bemerkt haben, zeigen die für die stark angeblasenen engeren zylindrischen Pfeifenregister der Orgel angewendeten Namen: Geigenprinzipal, Viola di Gamba, Violoncell, Violonbaß.

Daß die Wirklichkeit den hier aus der Mechanik des Anblasens gezogenen Schlüssen entspricht, zeigen die Versuche der Herren Toepler und Boltzmann[1]), die auf optischem Wege mittels der Interferenz des Lichtes, welches durch einen Knoten der schwingenden Luftmasse gegangen war, die Form der Druckoszillation im Inneren der Pfeife beobachtbar gemacht haben. Sie fanden bei schwächerem Anblasen nahehin eine einfache Schwingung (je geringer die Oszillation des Luftblattes an der Lippe, desto mehr verwischen sich die Diskontinuitäten), dagegen bei stärkerem Anblasen einen sehr schnell erfolgenden Wechsel zwischen zwei verschiedenen Werten des Druckes, deren jeder während eines Bruchteiles der Schwingung fast unverändert blieb.

Andererseits bestätigen Versuche der Herren Mach und J. Hervert[2]), bei denen Gasflammen, vor der Öffnung einer offenen Pfeife brennend, die Schwingungen sichtbar machten, daß die beschriebene Bewegungsform an den Enden der Pfeifen vorhanden ist. Die von ihnen aus der Analyse der Flammenformen abgeleiteten Schwingungsformen entsprechen denen der Violinsaite, nur daß aus dem oben bezeichneten Grund die Ecken abgerundet sind.

Bei den engeren offenen Prinzipalpfeifen kann man mit Hilfe der Resonatoren deutlich die sechs ersten Partialtöne ihres Klanges hören.

[1]) Pogg. Ann. **141**, 321—352.
[2]) Pogg. Ann. **147**, 590—604.

Bei den weiteren offenen Pfeifen dagegen sind die nächstliegenden Eigentöne des Rohres alle etwas höher als die entsprechenden harmonischen Töne des Grundtones, und deshalb werden die letzteren durch die Resonanz des Rohres viel weniger verstärkt. Die weiten Pfeifen, welche wegen ihrer größeren schwingenden Luftmasse und weil sie stärkeres Anblasen erlauben, ohne in einen Oberton überzuspringen, die Hauptklangmasse der Orgel geben, und deshalb Prinzipalstimmen heißen, bringen aus dem angeführten Grunde allein den Grundton stark und voll, mit schwächerer Begleitung von Nebentönen. Bei hölzernen Prinzipalpfeifen finde ich den ersten Oberton, die Oktave, sehr deutlich, den zweiten, die Duodezime, schon schwach, die höheren nicht mehr deutlich wahrnehmbar. Bei metallenen war auch noch der vierte Partialton wahrnehmbar. Die Klangfarbe dieser Pfeifen ist voller und weicher als die der Geigenprinzipale. Bei schwachem Anblasen in den Flötenregistern der Orgel und auf der Querflöte verlieren die Obertöne ebenfalls verhältnismäßig mehr an Stärke als der Grundton, und der Klang wird schwach und weich.

Eine andere Veränderung bieten die nach oben kegelförmig verengten Pfeifen aus den Registern Salicional, Gemshorn, Spitzflöte. Ihre obere Öffnung hat meist die Hälfte des Durchmessers des unteren Querschnittes; Salicional hat den engsten, Spitzflöte den größten Querschnitt bei gleicher Länge. Diese Pfeifen haben, wie ich finde, das Eigentümliche, daß einige höhere Teiltöne, der fünfte bis siebente, verhältnismäßig deutlicher werden als die niederen. Der Klang ist leer, aber eigentümlich hell durch diesen Umstand.

Die gedackten zylindrischen Pfeifen haben bei enger Mensur eigene Töne, welche den ungeradzahligen Teiltönen des Grundtones, also dem dritten oder der Duodezime, dem fünften oder der höheren Terz usw. entsprechen. Bei den weiteren gedackten Pfeifen liegen, wie bei den weiten offenen Pfeifen, die nächsten eigenen Töne der Luftmasse merklich höher als die entsprechenden Obertöne des Grundtones, und letztere werden deshalb wenig oder gar nicht verstärkt. Weite gedackte Pfeifen, namentlich wenn sie schwach angeblasen werden, geben deshalb den Grundton fast rein. Wir haben sie schon vorher als Beispiele einfacher Töne angeführt. Engere lassen namentlich noch sehr deutlich die Duodezime mitklingen, was zu dem Namen derselben, Quintaten (quintam tenens), Veranlassung gegeben hat.

Übrigens ist auch der fünfte Teilton an diesen Pfeifen sehr deutlich, wenigstens wenn sie scharf angeblasen werden. Eine andere Abänderung der Klangfarbe entsteht bei der sogenannten Rohrflöte. Hier ist ein beiderseits offenes Röhrchen in den Deckel einer gedackten Pfeife eingesetzt, dessen Länge in den von mir untersuchten Beispielen so groß war, wie eine offene Pfeife sein müßte, die den fünften Teilton des Klanges geben sollte. Dadurch wird an diesen Pfeifen der fünfte Teilton verhältnismäßig stärker als der ziemlich schwache dritte hervorgehoben, wodurch der Klang etwas eigentümlich Helles erhält. Im Vergleich mit dem der offenen Pfeifen hat der Klang der gedackten Pfeifen, dem also die geradzahligen Partialtöne fehlen, etwas Hohles; die weiten gedackten Register klingen dumpf, namentlich in der Tiefe, weich und unkräftig. Sie bilden durch ihre Weichheit aber einen sehr wirksamen Gegensatz gegen die schärferen Klangfarben der engeren offenen und der rauschenden Mixturregister, von denen schon oben die Rede gewesen ist, und welche bekanntlich durch Verbindung mehrerer Pfeifen, die einem Grundton und seinen Obertönen entsprechen, zu einem Klang gebildet werden.

Die Holzpfeifen geben nicht so scharfes Blasegeräusch wie die metallenen, auch widerstehen ihre Wände nicht so gut der Erschütterung durch die Schallwellen, wobei die höheren Tonschwingungen leichter durch Reibung vernichtet zu werden scheinen. Holz gibt deshalb eine weichere oder dumpfere, weniger scharfe Klangfarbe.

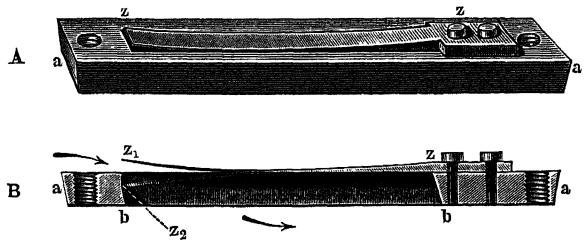
Charakteristisch für alle diese Pfeifen ist weiter, daß ihr Ton leicht anspricht, und sie deshalb eine große Beweglichkeit musikalischer Figuren zulassen, aber die Stärke ihres Klanges erlaubt fast gar keine Abwechselung, da die Tonhöhe durch geringe Verstärkung des Blasens schon merklich gesteigert wird. Auf der Orgel muß deshalb Forte und Piano durch die Registerzüge hervorgebracht werden, indem man bald mehr, bald weniger Pfeifen, bald starke und scharf tönende, bald schwache und weiche ansprechen läßt. Die Mittel des Ausdruckes auf diesem Instrument sind deshalb allerdings beschränkt, aber andererseits verdankt es offenbar einen Teil seiner großartigen Eigentümlichkeit dem Umstand, daß sein Ton in unveränderlicher Stärke, unberührt von subjektiven Erregungen hinausströmt.

6. Klänge der Zungenpfeifen.

Der Ton der hierher gehörigen Instrumente wird in ähnlicher Weise wie der der Sirene hervorgebracht dadurch, daß der Weg des Luftstromes sich abwechselnd öffnet und schließt, wodurch denn der Luftstrom selbst in eine Reihe einzelner Luftstöße zerlegt wird. In der Sirene geschieht dies, wie wir oben auseinander gesetzt haben, mittels der rotierenden durchlöcherten Scheibe; in den Zungenwerken sind es elastische Platten oder Bänder, welche in schwingende Bewegung gesetzt werden und dabei die Öffnung, in der sie befestigt sind, bald schließen, bald frei lassen. Es gehören hierher

1. Die Zungenpfeifen der Orgel und das Harmonium. Ihre Zungen, abgebildet perspektivisch in Fig. 28 *A*, im Durchschnitt Fig. 28 *B*, sind länglich viereckige Metallblättchen, *zz*, welche auf

Fig. 28.

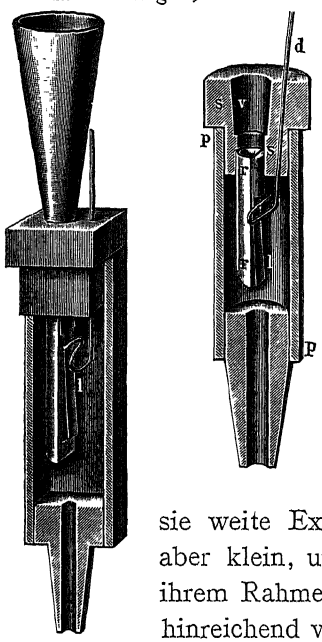


einer ebenen Messingplatte *aa* befestigt sind, in der hinter der Zunge eine Öffnung *bb* von gleicher Gestalt wie die Zunge angebracht ist. Wenn die Zunge in ihrer Ruhelage sich befindet, schließt sie die Öffnung ganz bis auf einen möglichst feinen Spalt längs ihres Randes. Wenn sie in Schwingung versetzt wird, schwankt sie zwischen den in Fig. 28 *B* mit z_1 und z_2 bezeichneten Stellungen hin und her. In der Stellung z_1 ist, wie man sieht, eine Öffnung für die einströmende Luft gebildet, deren Richtung durch den Pfeil angedeutet ist; bei der entgegengesetzten Ausbeugung der Zungen nach z_2 hin ist dagegen die Öffnung geschlossen. Die dargestellte Zunge ist eine durchschlagende, wie sie gegenwärtig allgemein gebräuchlich sind. Solche Zungen sind etwas kleiner als die zugehörige Öffnung, so daß sie sich in diese hineinbiegen können, ohne die Ränder der Öffnung zu berühren. Früher brauchte man auch aufschlagende Zungen, welche

bei jeder Schwingung gegen ihren Rahmen schlugen; diese geben aber einen sehr rasselnden Ton und unsichere Tonhöhe.

Die Art, wie die Zungen in den Zungenregistern der Orgel befestigt sind, ist abgebildet in A und B, Fig. 29. *A* trägt oben einen Schalltrichter, *B* ist der Länge nach durchschnitten gedacht; *pp* ist das Windrohr, in welches von unten der Wind eingetrieben wird; die Zunge *l* ist in der Rinne *r*, und diese in dem hölzernen Stopfen *s* befestigt; *d* ist der Stimmdraht. Dieser drückt unten gegen die Zunge; wenn man ihn tiefer hineinschiebt, macht man die Zunge kürzer und ihren Ton höher; umgekehrt, wenn man ihn herauszieht. Dadurch kann man leicht kleine Änderungen der Tonhöhe beliebig herbeiführen.

A Fig. 29. B

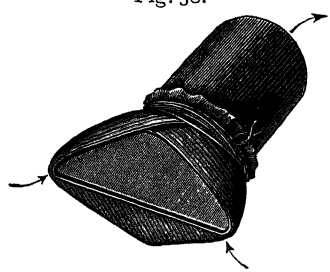


2. Ziemlich ähnlich konstruiert sind die aus elastischen Rohrplatten geschnitzten Zungen der Klarinette, der Oboe und des Fagotts. Die Klarinette hat nur eine breite Zunge, die ähnlich den beschriebenen Metallzungen vor einer entsprechenden Öffnung des Mundstückes befestigt ist und aufschlagen würde, wenn sie weite Exkursionen machte. Ihre Exkursionen sind aber klein, und sie wird durch den Druck der Lippen ihrem Rahmen nur so weit genähert, daß sie die Spalte hinreichend verengt, ohne aufzuschlagen. Bei der Oboe und dem Fagott stehen am Ende des Mundstückes zwei solche Rohrzungen einander gegenüber, welche durch einen schmalen Spalt getrennt sind und ebenfalls beim Blasen so weit aneinander gedrängt werden, daß sie den Spalt schließen, so oft sie nach innen schwingen.

3. Membranöse Zungen. Ihre Eigentümlichkeiten studiert man am besten an künstlich verfertigten Zungen dieser Art. Zu dem Ende schneidet man das obere Ende eines hölzernen oder Guttapercharohres von zwei Seiten her schräg so ab, wie Fig. 30 zeigt, daß zwei etwa rechtwinkelige Spitzen zwischen den beiden schrägen Schnittflächen stehen bleiben. Dann legt man mit leichter Spannung Streifchen von vulkanisiertem Kautschuk über die beiden Abdachungsflächen, so

daß sie oben einen schmalen Spalt zwischen sich lassen, und umschlingt sie mit einem Faden. Auf solche Weise ist ein Zungenmundstück hergestellt, welches man beliebig mit Röhren oder anderen Lufträumen verbinden kann. Wenn die Membranen sich nach innen biegen, schließen sie den Spalt, nach außen biegend, öffnen sie ihn. Solche schräg gestellte Membranen sprechen viel leichter an, als wenn man sie nach Johannes Müllers Vorschlag senkrecht gegen die Achse des Rohres stellt. Dann müssen sie erst durch den Luftdruck ausgebogen sein, ehe ihre Schwingung die Spalte abwechselnd zu öffnen und zu schließen beginnen kann. Man kann solche membranöse Zungen sowohl in Richtung der Pfeife anblasen, als in entgegengesetzter Richtung. Im ersten Falle öffnen sie den Spalt, wenn sie sich gegen den Luftbehälter, also nach der Tiefe der Röhrenleitung bewegen. Solche Zungen nenne ich einschlagende; sie geben angeblasen immer tiefere Töne, als wenn man sie frei schwingen läßt ohne Verbindung mit einem Luftraum. Die bisher erwähnten Zungen der Orgelpfeifen, des Harmoniums und der Holzblasinstrumente sind ebenfalls stets als einschlagende gestellt. Man kann die membranösen (und auch die metallenen) Zungen aber auch entgegengesetzt gegen den Luftstrom stellen, so daß sie den Weg öffnen, wenn sie sich nach der äußeren Öffnung des Instrumentes hin bewegen. Dann nenne ich sie ausschlagende Zungen. Die Töne der ausschlagenden Zungen sind stets höher als die der isolierten Zunge.

Fig. 30.



Als musikalische Instrumente kommen nur zwei Arten solcher membranöser Zungen in Betracht, nämlich die menschlichen Lippen beim Anblasen der Blechinstrumente und der menschliche Kehlkopf im Gesang.

Die Lippen sind als sehr schwach elastische, mit vielem, wasserhaltigem, unelastischem Gewebe belastete membranöse Zungen zu betrachten, die deshalb verhältnismäßig sehr langsam schwingen würden, wenn man sie isoliert dazu bringen könnte. Sie bilden in den Blechinstrumenten ausschlagende Zungen, welche nach der eben angegebenen Regel höhere Töne geben müssen, als ihr Eigenton ist.

Wegen ihres geringen Widerstandes werden sie aber beim Gebrauch der Blechinstrumente auch leicht durch den wechselnden Druck der schwingenden Luftsäule in Bewegung gesetzt.

Im Kehlkopf spielen die elastischen Stimmbänder die Rolle membranöser Zungen. Sie sind von vorn nach hinten gespannt, ähnlich den Kautschukbändern der Fig. 30, und lassen zwischen sich einen Spalt, die Stimmritze. Sie haben vor allen künstlich nachgebildeten Zungen den Vorzug voraus, daß die Weite ihres Spaltes, ihre Spannung und selbst ihre Form willkürlich außerordentlich schnell und sicher geändert werden kann. Hierzu kommt noch die große Veränderlichkeit des durch die Mundhöhle gebildeten Ansatzrohres. Es kann daher durch die Stimmbänder eine viel größere Mannigfaltigkeit von Klängen hervorgebracht werden, als durch irgend ein künstliches Instrument. Wenn man sie mit dem Kehlkopfspiegel von oben her betrachtet, während ein Ton hervorgebracht wird, so sieht man sie namentlich bei tieferen Brusttönen sehr ausgiebige Schwingungen machen, wobei die Stimmritze ganz eng geschlossen wird, so oft sie nach innen schlagen.

Die Tonhöhe der hier erwähnten verschiedenen Zungenwerke wird mittels sehr verschiedener Verfahrungsweisen geändert. Die metallenen Zungen der Orgel und des Harmoniums sind immer nur für die Erzeugung eines einzigen Tones bestimmt. Auf die Bewegung dieser verhältnismäßig schweren und steifen Zungen hat der Druck der schwingenden Luft einen sehr geringen Einfluß, so daß auch ihre Tonhöhe innerhalb des Instrumentes sich nur wenig von derjenigen zu unterscheiden pflegt, welche die freie Zunge für sich gibt. Für jede Note müssen diese Instrumente mindestens eine Zunge haben.

In den Holzblasinstrumenten haben wir nur eine einzige Zunge, welche für die ganze Notenreihe dienen muß. Die Zungen dieser Instrumente sind aber aus leichtem, elastischem Holz gebildet, welches durch den wechselnden Druck der schwingenden Luftmasse leicht in Bewegung gesetzt wird und die Schwingungen der Luft mitmacht. Es können die genannten Instrumente deshalb außer solchen sehr hohen Tönen, die der eigenen Tonhöhe ihrer Zungen nahe entsprechen würden, wie Theorie und Erfahrung übereinstimmend zeigen[1]),

[1]) Siehe Helmholtz, Verhandlungen des naturhistorischen medizinischen Vereins zu Heidelberg vom 26. Juli 1861, in den Heidelberger Jahrbüchern. — Pogg. Ann. 114, 321, 1861. (Wiss. Abh. 1, 388.)

auch noch andere, von dieser Tonhöhe weit entfernte tiefere Töne hervorbringen. Nur müssen die in dem Rohr des Instrumentes entstehenden Luftwellen noch imstande sein, in dessen Tiefe, wo sich die Zunge befindet, einen so starken Wechsel des Luftdruckes hervorzubringen, daß die Zunge merklich bewegt wird. Der Druckwechsel in einer schwingenden Luftsäule ist aber da am größten, wo die Geschwindigkeit der Luftteilchen am kleinsten ist. Er ist folglich ein Maximum am Ende eines geschlossenen Rohres, wie das der gedackten Orgelpfeifen ist, wo die Geschwindigkeit immer gleich Null, also ein Minimum ist. Dadurch aber läßt sich die Tonhöhe der besprochenen Töne der Zungenpfeife bestimmen. Diese sind nämlich gleich denen, welche das Ansatzrohr allein hervorbringen würde, wenn es am Orte der Zunge verschlossen wäre und als gedackte Pfeife angeblasen würde. In der musikalischen Anwendung werden nun diejenigen Töne dieser Instrumente, welche dem eigenen Ton der Zunge entsprechen, gar nicht gebraucht, weil sie sehr hoch und kreischend sind, auch ihre Tonhöhe nicht hinreichend unveränderlich sein kann, wenn die Zunge feucht wird; es werden vielmehr nur solche Töne hervorgebracht, welche viel tiefer als der Ton der Zunge sind, und deren Tonhöhe von der Länge der Luftsäule abhängt, indem sie den eigenen Tönen des gedackten Rohres entsprechen.

Die Klarinette hat ein zylindrisches Rohr, dessen Eigentöne dem dritten, fünften, siebenten usw. Teilton des Grundtones entsprechen. Durch verändertes Anblasen kann man vom Grundton auf die Duodezime oder die höhere Terz übergehen; außerdem läßt sich die akustische Länge des Rohres verändern, wenn man die Seitenlöcher der Klarinette öffnet, indem dann hauptsächlich nur die Luftsäule zwischen dem Mundstück und dem obersten geöffneten Seitenloch schwingt.

Die Oboe und das Fagott haben kegelförmige Röhren. Kegelförmige Röhren, welche bis zur Spitze ihres Kegels hin geschlossen sind, haben Eigentöne, welche denen von gleich langen offenen Röhren gleich sind. Dementsprechend sind denn auch die Töne der beiden genannten Instrumente nahehin entsprechend denen von offenen Pfeifen. Durch Überblasung geben sie die Oktave, Duodezime, zweite Oktave usw. des Grundtones. Die Töne dazwischen werden durch Öffnung der Seitenlöcher gewonnen.

Die älteren Hörner und Trompeten bestehen aus einem langen kegelförmigen, gewundenen Rohr ohne Klappen oder Ventile; sie können nur solche Töne geben, welche den eigenen Tönen des Rohres entsprechen, die hier wieder den natürlichen harmonischen Obertönen des Grundtones gleich sind. Da der Grundton eines so langen Rohres aber sehr tief ist, liegen die Obertöne in den mittleren Gegenden der Skala ziemlich nahe zusammen, namentlich bei dem sehr langen Rohr des Hornes[1]), so daß dadurch die meisten Stufen der Skala gegeben sind. Die Trompete war auf diese natürlichen Töne beschränkt, beim Horn konnte man mit der Faust, die den Schallbecher verengert, bei der Posaune durch den Auszug des Rohres die fehlenden Töne einigermaßen ergänzen, die unpassenden verbessern. In neuerer Zeit hat man Trompeten und Hörner vielfältig mit Klappen versehen, um die fehlenden Töne zu ergänzen, wobei aber die Kraft des Tones und der Glanz der Klangfarbe einigermaßen leidet. Die Schwingungen der Luft in diesen Instrumenten sind ungemein mächtig, und nur feste, glatte und undurchbrochene Röhren können ihnen vollen Widerstand leisten, so daß nichts von ihrer Kraft verloren geht. Beim Gebrauch der Blechinstrumente kommt die verschiedene Form und Spannung der Lippen des Bläsers nur insoweit in Betracht, als dadurch bestimmt wird, welcher von den eigenen Tönen des Rohres anspricht, während die Höhe der einzelnen Töne so gut wie unabhängig von der Spannung der Lippen ist.

Im menschlichen Kehlkopf dagegen wird die Spannung der Stimmbänder, welche hier die membranösen Zungen bilden, selbst verändert und bestimmt die Höhe des Tones. Die mit dem Kehlkopf verbundenen Lufthöhlen sind nicht geeignet, den Ton der Stimmbänder beträchtlich zu verändern; namentlich haben sie zu nachgiebige Wände, als daß in ihnen Luftschwingungen zustande kommen könnten, stark genug, um den Stimmbändern eine Schwingungsperiode aufzudrängen, die nicht der von ihrer eigenen Elastizität geforderten sich anpaßt. Auch ist die Mundhöhle ein zu kurzes und meist zu weit geöffnetes Ansatzrohr, als daß ihre Luftmasse wesentlichen Einfluß auf die Tonhöhe haben könnte.

[1]) Das Rohr des Waldhornes ist nach Zamminer 13,4 Fuß lang, sein eigentlicher Grundton Es_{-1}; dieser und der nächste, *Es*, werden nicht gebraucht, wohl aber die weiteren Töne *B*, *es*, *g*, *b*, *des'*—, *es'*, *f'*, *g'*, *as'*—*a'*, *b'* usw.

Außer der veränderten Spannung der Stimmbänder, welche nicht bloß durch Entfernung ihrer Ansatzpunkte an den Knorpeln des Kehlkopfes voneinander vergrößert werden kann, sondern auch durch willkürliche Spannung der in ihnen gelegenen Muskelfasern, scheint auch die Dicke der Stimmbänder sich verändern zu können. Es liegt nach unten von den eigentlich elastischen Faserzügen und Muskelfasern der Stimmbänder noch viel weiches, mit Wasser getränktes, unelastisches Gewebe, welches bei der Bruststimme wahrscheinlich als Belastung der elastischen Bänder eine Rolle spielt und ihre Schwingungen verlangsamt. Die Fistelstimme entsteht wahrscheinlich dadurch, daß die unter den Bändern gelegene Schleimhautmasse nach der Seite gezogen wird, und so der Rand der Bänder schärfer, das Gewicht ihres schwingenden Teiles vermindert wird, während ihre Elastizität dieselbe bleibt.

Wir kommen jetzt zur Erörterung der Klangfarbe der Zungenpfeifen, unserem eigentlichen Gegenstande. Der Schall wird in diesen Pfeifen erregt durch die intermittierenden Luftstöße, welche durch die von der Zunge begrenzte Öffnung während jeder einzelnen Schwingung hervorbrechen. Eine frei schwingende Zunge hat eine viel zu kleine Oberfläche, als daß sie eine irgend in Betracht kommende Quantität von Schallbewegung an die Luft abgeben könnte; ebenso wenig geschieht dies in den Pfeifen. Der Schall entsteht vielmehr ganz so, wie in der Sirene, deren Metallscheibe gar keine Schallschwingungen ausführt, nur durch die Luftstöße. Durch die wechselnde Öffnung und Verschließung des Kanals wird der kontinuierliche Fluß des Luftstromes in eine periodisch wiederkehrende Bewegung verwandelt, welche das Ohr zu affizieren vermag. Wie jede periodische Bewegung der Luft kann auch diese in eine Reihe von einfachen Schwingungen zerlegt werden. Schon früher ist bemerkt worden, daß die Zahl der Glieder einer solchen Reihe desto größer ist, je diskontinuierlicher die zu zerlegende Bewegung ist. Das ist nun die Bewegung der durch eine Sirene oder an einer Zunge vorbeiströmenden Luft in hohem Grade, da die einzelnen Luftstöße während der Zeiträume, wo die Öffnung geschlossen ist, meist durch vollständige Pausen voneinander getrennt sein müssen. Freie Zungen ohne Ansatzrohr, bei denen alle die einzelnen einfachen Töne der von ihnen erregten Luftbewegung unmittelbar und frei an die umgebende Luft-

masse übergehen, haben deshalb immer einen sehr scharfen, schneidenden oder schnarrenden Klang, und man hört in der Tat mit bewaffnetem oder unbewaffnetem Ohr eine lange Reihe von Obertönen bis zum sechzehnten oder zwanzigsten stark und deutlich, und selbst noch höhere Obertöne sind offenbar vorhanden, wenn auch schwer oder gar nicht voneinander zu scheiden, da sie einander näher liegen als halbe Tonstufen. Dieses Gewirr dissonierender Töne macht die Klänge freier Zungen sehr unangenehm. Eine solche Art des Klanges zeigt ebenfalls, daß die Luftstöße die Quelle des Tones sind. Ich habe die schwingende Zunge einer Zungenpfeife, wie Fig. 30, während sie angeblasen wurde, nach Lissajous' Methode mit dem Vibrationsmikroskop beobachtet, um die Schwingungsform der Zunge zu ermitteln, und habe gefunden, daß die Zunge ganz regelmäßige einfache Schwingungen ausführt. Sie würde deshalb auch an die Luft nur einen einfachen Ton abgeben können, nicht einen zusammengesetzten Klang, wenn der erzeugte Schall wirklich direkt durch ihre Schwingungen hervorgebracht würde.

Übrigens ist nun die Stärke der Obertöne, welche eine Zunge ohne Ansatzrohr gibt, und ihr Verhältnis zum Grundton sehr abhängig von der Beschaffenheit der Zunge, von ihrer Stellung zum Rahmen, von der Dichtigkeit, mit der sie schließt usw. Aufschlagende Zungen, welche die am meisten diskontinuierlichen Luftstöße geben, geben auch den schärfsten Klang. Je kürzer die Luftstöße, je plötzlicher sie eintreten, desto mehr hohe Obertöne werden wir erwarten dürfen, ganz wie es bei der Sirene nach Seebecks Untersuchungen der Fall ist. Hartes unnachgiebiges Material, wie das der Messingzungen, wird die Luftstöße viel abgerissener hervortreten lassen, als weiches nachgiebiges. Hierin haben wir wahrscheinlich hauptsächlich den Grund zu suchen, warum unter allen Klängen von Zungenpfeifen die menschlichen Gesangstöne gut gebildeter Kehlen sich durch Weichheit auszeichnen. Indessen ist auch an den menschlichen Stimmen, namentlich wenn sie in angestrengtem Forte gebraucht werden, die Zahl der hohen Obertöne sehr groß, sie reichen noch sehr deutlich und kräftig bis in die viergestrichene Oktave hinauf, worauf wir gleich nachher zurückkommen werden.

Wesentlich verändert sich nun der Klang der Zungen durch die Ansatzröhren, indem nämlich diejenigen Obertöne, welche eigenen Tönen des Ansatzrohres entsprechen, beträchtlich verstärkt werden

und hervortreten, ähnlich wie das bei den Orgelpfeifen mit den Tönen des Luftgeräusches geschah. Die Ansatzröhren müssen dabei als an der Stelle der Zunge geschlossen betrachtet werden[1]).

Ich habe als Ansatzrohr einer Messingzunge, wie sie in den Orgeln gebraucht wird, und welche *b* gab, eine meiner größeren Resonanzkugeln aufgesetzt, welche ebenfalls auf *b* abgestimmt war. Nachdem der Druck im Blasebalg beträchtlich gesteigert war, sprach die Zunge an, etwas tiefer als sonst, aber ich erhielt einen außerordentlich vollen, starken, schönen und weichen Klang, dem fast alle Obertöne fehlten. Ich gebrauchte dabei wenig Luft, diese aber von starkem Druck. Hier war nur der Grundton des Klanges im Einklang mit der stark resonierenden Glaskugel, und wurde deshalb sehr mächtig. Keiner der höheren Töne konnte verstärkt werden. Die Theorie der Luftschwingungen in der Kugel zeigt weiter, daß in der Kugel der höchste Druck immer eintreten mußte, zu der Zeit, wo die Zunge sich öffnete. Daher war starker Druck im Blasebalg nötig, um den gesteigerten Druck in der Kugel zu überwinden, und trotz dessen wurde nicht viel Luft entleert.

Wenn man statt der Glaskugel andere Aufsatzröhren anwendet, welche eine größere Anzahl von eigenen Tönen haben, so erhält man auch zusammengesetztere Klänge. An der Klarinette haben wir ein zylindrisches Rohr, welches durch seine Resonanz die ungeradzahligen Obertöne des Klanges verstärkt. Die kegelförmigen Röhren der Oboen, Fagotte, Trompeten und Hörner verstärken dagegen sämtliche harmonische Obertöne des Klanges bis zu einer gewissen Höhe hinauf. Für Tonwellen nämlich, deren Länge die Weite der Öffnungen nicht bedeutend übertrifft, geben die Röhren keine Resonanz mehr. So habe ich denn in der Tat in dem Klang der Klarinetten nur ungerade Obertöne gefunden, deutlich bis zum siebenten hinauf, während die Klänge der übrigen genannten Instrumente, deren Röhren kegelförmig sind, auch die geradzahligen enthalten. Über die weiteren Unterschiede des Klanges der einzelnen Instrumente mit kegelförmigen Röhren hatte ich aber bis jetzt keine Gelegenheit, Beobachtungen zu machen. Es ist dies ein ziemlich weitläufiges Feld der Untersuchung, da die Klangfarbe auch durch

[1]) Siehe Beilage VII.

die Art des Anblasens sich vielfältig verändert und selbst an demselben Instrument die verschiedenen Teile der Skala, wenn sie die Eröffnung von Seitenlöchern erfordern, ziemlich verschiedene Klangfarbe haben. Namentlich sind an den Holzblasinstrumenten diese Unterschiede auffallend. Die Eröffnung von Seitenlöchern ist kein ganz vollständiger Ersatz für die Verkürzung des Rohres, und die Reflexion der Schallwellen geschieht dort nicht wie an einem freien offenen Ende des Rohres. Die Obertöne eines solchen Rohres, welches durch ein geöffnetes Seitenloch abgegrenzt ist, werden meist beträchtlich abweichen müssen von der harmonischen Reinheit, und dies wird auf ihre Resonanz merklichen Einfluß haben.

7. Klänge der Vokale.

Wir haben bisher diejenigen Fälle von Resonanz des Ansatzrohres besprochen, wo dasselbe imstande war, zunächst den Grundton und außer diesem noch eine gewisse Anzahl von den harmonischen Obertönen des betreffenden Klanges zu verstärken. Es kann nun auch der Fall vorkommen, daß der tiefste Ton des Ansatzrohres nicht dem Grundton, sondern einem der Obertöne des Klanges entspricht, und in solchen Fällen finden wir den bisher entwickelten Grundsätzen gemäß, daß in der Tat der betreffende Oberton auch mehr als der Grundton und die übrigen Obertöne durch die Resonanz des Ansatzrohres verstärkt wird und sich deshalb aus der Reihe der übrigen Obertöne besonders stark heraushebt. Der Klang bekommt dadurch einen besonderen Charakter, er wird nämlich einem der Vokale der menschlichen Stimme mehr oder weniger ähnlich. Denn in der Tat sind die Vokale der menschlichen Stimme Töne membranöser Zungen, nämlich der Stimmbänder, deren Ansatzrohr, die Mundhöhle, verschiedene Weite, Länge und Stimmung erhalten kann, so daß dadurch bald dieser, bald jener Teilton des Klanges verstärkt wird[1]).

Um die Zusammensetzung der Vokalklänge zu begreifen, muß man zunächst berücksichtigen, daß der Ursprung ihres Schalles in

[1]) Die Theorie der Vokaltöne ist zuerst von Wheatstone in einer leider wenig bekannt gewordenen Kritik über die Versuche von Willis aufgestellt worden. Diese Versuche sind beschrieben in Transact. of Cambridge Phil. Soc. 3, 231. Pogg. Ann. d. Phys. 24, 397, 1832. — Wheatstones Bericht darüber in London and Westminster Review 1837, Oktober.

den Stimmbändern liegt. Diese wirken bei laut tönender Stimme als membranöse Zungen und bringen wie alle Zungen zunächst eine Reihe entschieden diskontinuierlicher und scharf getrennter Luftstöße hervor, die, wenn sie als eine Summe einfacher Schwingungen dargestellt werden sollen, einer sehr großen Anzahl von solchen Schwingungen entsprechen und deshalb im Ohr als ein aus einer ziemlich langen Reihe von Obertönen zusammengesetzter Klang erscheinen. Mit Hilfe der Resonanzröhren kann man in tiefen, kräftig gesungenen Baßnoten bei den helleren Vokalen sehr hohe Obertöne, selbst bis zum sechzehnten hin, erkennen, und bei etwas angestrengtem Forte der höheren Noten jeder menschlichen Stimme erscheinen deutlicher als bei allen anderen Tonwerkzeugen hohe Obertöne aus der Mitte der viergestrichenen Oktave (der obersten Oktave der neuen Klaviere), von deren besonderer Beziehung zum Ohr wir später noch sprechen werden. Die Stärke der Obertöne, namentlich der ganz hohen, ist übrigens ziemlich großen individuellen Verschiedenheiten unterworfen. Sie ist bei scharfen und hellen Stimmen größer als bei weichen und dumpfen. Bei scharfen Stimmen mag der Grund ihrer Klangfarbe vielleicht darin zu suchen sein, daß die Ränder der Stimmbänder nicht glatt oder gerade genug sind, um sich zu einem engen geradlinigen Spalt zusammenlegen zu können, ohne dabei aneinander zu stoßen, und daß dadurch der Kehlkopf sich mehr den aufschlagenden Zungenwerken nähert, die eine viel schärfere Klangfarbe haben, während die normalen Stimmbänder durchschlagende Zungen sind. Bei heiseren Stimmen kann vielleicht der Grund darin gesucht werden, daß kein ganz vollkommener Schluß der Stimmritze zustande kommt, während die Bänder schwingen. Wenigstens erhält man von künstlichen membranösen Zungen ähnliche Abänderungen des Klanges, wenn man entsprechende Änderungen ihrer Stellung ausführt. Zu einem starken und doch weichen Klang der Stimme ist es nötig, daß die Stimmbänder auch bei den stärksten Schwingungen in den Augenblicken, wo sie sich einander nähern, sich geradlinig ganz eng aneinander stellen, so daß sie momentan die Stimmritze vollständig schließen, ohne doch aufeinander zu schlagen. Wenn sie nicht vollständig schließen, wird der Luftstrom nicht vollständig unterbrochen, und der Ton kann nicht stark werden. Wenn sie aneinander schlagen, muß, wie schon bemerkt ist, der Klang scharf werden, wie von auf-

schlagenden Zungen. Wenn man durch den Kehlkopfspiegel die tönenden Stimmbänder betrachtet, ist es auffallend, mit welcher Genauigkeit sie schließen bei Schwingungen, deren Breite fast der ganzen Breite der Bänder gleich ist.

Übrigens findet beim Sprechen und beim Singen eine gewisse Verschiedenheit im Ansatz der Stimme statt. Beim Sprechen bringen wir einen viel schärferen Klang, namentlich der offenen Vokale, hervor und fühlen im Kehlkopf einen stärkeren Druck. Ich vermute, daß beim Sprechen die Stimmbänder als aufschlagende Zungen gestellt werden.

Wenn die Schleimhaut des Kehlkopfes katarrhalisch ist, sieht man durch den Kehlkopfspiegel zuweilen kleine Schleimflöckchen in die Stimmritze eintreten. Diese stören, wenn sie zu groß sind, die Bewegung der schwingenden Bänder und machen sie unregelmäßig, wobei auch der Klang unregelmäßig, knarrend oder heiser wird. Übrigens ist merkwürdig, wie verhältnismäßig große Schleimflöckchen in der Stimmritze liegen können, ohne eine gerade sehr auffallende Verschlechterung des Klanges hervorzubringen.

Es ist schon erwähnt worden, daß es meist viel schwerer ist, die Obertöne der menschlichen Stimme mit unbewaffnetem Ohr zu erkennen, als die Obertöne anderer Tonwerkzeuge; die Resonatoren sind für diese Untersuchung notwendiger, als für die Analyse irgend eines anderen Klanges. Doch sind sie zuweilen von aufmerksamen Beobachtern gehört worden; schon Rameau hat sie im Anfang des vorigen Jahrhunderts gekannt, und später erwähnt Seiler in Leipzig, daß er in schlaflosen Nächten, auf den Gesang des Nachtwächters lauschend, zuweilen anfangs aus der Ferne die Duodezime des Gesanges gehört habe, und später erst den Grundton. Der Grund dieser Schwierigkeit ist wohl darin zu suchen, daß wir die Klänge der menschlichen Stimme mehr, als irgend welche andere, unser Leben hindurch immer nur in der Absicht, sie als ein Ganzes aufzufassen und die mannigfachen Abänderungen ihrer Klangfarbe genau kennen zu lernen und wahrzunehmen, verfolgt und beobachtet haben.

Wir dürfen wohl annehmen, daß bei den Klängen des menschlichen Kehlkopfes, wie bei denen anderer Zungenwerke, die Obertöne mit steigender Höhe an Stärke kontinuierlich abnehmen würden, wenn wir sie ohne die Resonanz der Mundhöhle beobachten könnten. In der Tat entsprechen sie dieser Annahme ziemlich gut bei denjenigen

Vokalen, welche mit trichterförmig weit geöffneter Mundhöhle gesprochen werden, nämlich beim scharfen *A* oder *Ä*. Dieses Verhältnis wird nun aber sehr wesentlich verändert durch die Resonanz in der Mundhöhle. Je mehr die Mundhöhle verengert ist durch die Lippen, die Zähne oder die Zunge, desto entschiedener kommt ihre Resonanz für Töne von ganz bestimmter Höhe zum Vorschein, und desto mehr verstärkt sie dann auch in dem Klang der Stimmbänder diejenigen Obertöne, welche sich den bevorzugten Graden der Tonhöhe nähern, desto mehr werden dagegen die übrigen gedämpft. Bei der Untersuchung des Klanges der menschlichen Stimme mittels der Resonatoren findet man deshalb wohl ziemlich regelmäßig die ersten sechs bis acht Obertöne zwar deutlich wahrnehmbar, aber je nach den verschiedenen Stellungen der Mundhöhle in sehr verschiedener Stärke, bald mächtig in das Ohr hineinschmetternd, bald kaum vernehmbar.

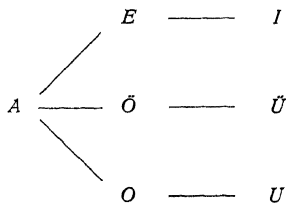
Unter diesen Verhältnissen ist die Untersuchung der Resonanz in der Mundhöhle von großer Wichtigkeit. Das sicherste und leichteste Verfahren, diejenigen Töne zu finden, auf welche die Luftmasse der Mundhöhle in den verschiedenen Stellungen abgestimmt ist, die sie zur Hervorbringung der verschiedenen Vokale annimmt, ist dasselbe, welches man für Glasflaschen und andere Lufträume anwendet. Man nimmt nämlich angeschlagene Stimmgabeln von verschiedener Höhe und bringt sie vor die Mündung des Luftraumes, in unserem Falle vor den geöffneten Mund, wobei man dann den Ton der Stimmgabel um so stärker hört, je genauer er einem der eigenen Töne der in der Mundhöhle eingeschlossenen Luftmasse entspricht. Da man die Stellung der Mundhöhle willkürlich verändern kann, so läßt sie sich denn auch stets dem Ton einer gegebenen Stimmgabel anpassen, und man ermittelt also auf diese Weise leicht, welche Stellungen man der Mundhöhle geben müsse, damit ihre Luftmasse auf eine bestimmte Tonhöhe abgestimmt sei.

Es stand mir eine Reihe von Stimmgabeln zu Gebote, mit denen ich bei einer solchen Untersuchung folgende Resultate gefunden habe.

Die Tonhöhen stärkster Resonanz der Mundhöhle hängen nur ab von dem Vokal, für dessen Bildung man die Mundteile zurecht gestellt hat, und ändern sich ziemlich beträchtlich selbst bei kleinen Abänderungen in der Klangfarbe des Vokales, wie sie etwa in verschiedenen Dialekten derselben Sprache vorkommen. Dagegen sind

die Eigentöne der Mundhöhle fast unabhängig von Alter und Geschlecht. Ich habe im allgemeinen dieselben Resonanzen bei Männern, Frauen und Kindern gefunden. Was der kindlichen und weiblichen Mundhöhle an Geräumigkeit abgeht, kann durch engeren Verschluß der Öffnung leicht ersetzt werden, so daß die Resonanz doch ebenso tief werden kann, wie in der größeren männlichen Mundhöhle.

Die Vokale zerfallen in drei Reihen nach der Stellung der Mundteile, welche wir mit dem älteren du Bois-Reymond[1]) folgendermaßen hinschreiben können:



Der Vokal *A* bildet den gemeinsamen Ausgangspunkt für alle drei Reihen. Ihm entspricht eine sich vom Kehlkopf ab ziemlich gleichmäßig trichterförmig erweiternde Gestalt der Mundhöhle. Bei den Vokalen der untersten Reihe *O* und *U* wird die Mundhöhle vorn mittels der Lippen verengert, so daß sie beim *U* vorn am engsten ist, während sie durch Herabziehen der Zunge in ihrer Mitte möglichst erweitert wird, im ganzen also die Gestalt einer Flasche ohne Hals erhält, deren Öffnung, der Mund, ziemlich eng ist, deren innere Höhlung aber nach allen Richtungen hin ohne weitere Scheidung zusammenhängt. Die Tonhöhe solcher flaschenförmigen Räume ist desto tiefer, je weiter der Hohlraum und je enger seine Mündung ist. Gewöhnlich läßt sich nur ein Eigenton mit starker Resonanz deutlich erkennen; wenn andere eigene Töne existieren, so sind sie verhältnismäßig sehr hoch und haben nur schwache Resonanz. Diesen an Glasflaschen gemachten Erfahrungen entsprechend, findet man, daß bei einem ganz dumpfen *U*, wo die Mundhöhle am weitesten und der Mund am engsten ist, die Resonanz am tiefsten ausfällt, nämlich dem ungestrichenen *f* entspricht. Wenn man das *U* in *O* überführt, steigt die Resonanz allmählich, so daß bei einem vollklingenden reinen *O* die Stimmung

[1]) Norddeutsche Zeitschrift, redigiert von de la Motte Fouqué 1812. — Kadmus oder allgemeine Alphabetik von F. H. du Bois-Reymond, Berlin 1862, S. 152.

der Mundhöhle gleich *b'* ist. Die Stellung des Mundes beim *O* ist besonders günstig für die Resonanz; die Öffnung des Mundes ist weder zu groß noch zu klein, und die Höhle hinreichend geräumig. Wenn man daher eine auf *b'* gestimmte Gabel angeschlagen vor die Mundöffnung bringt, während man *O* leise spricht, oder auch nur die Mundteile in die Stellung bringt, als wollte man *O* sprechen, so hört man den Ton der Stimmgabel sehr voll und laut wiederklingen, so daß ein ganzes Auditorium ihn hören kann. Man kann auch die gewöhnlich von den Musikern gebrauchten, auf *a'* gestimmten Gabeln für denselben Zweck benutzen, nur muß man dann das *O* schon ein wenig dumpfer aussprechen, um die volle Resonanz zu erhalten.

Führt man die Mundhöhle aus der Stellung des *O* durch die des *Ȯ* und *Å* allmählich über in die des *A*, so steigt dementsprechend die Resonanz allmählich um eine Oktave bis *b''*. Dieser Ton entspricht dem norddeutschen *A*; das etwas schärfere *A* der Engländer und Italiener steigt bis zur Tonhöhe *d'''*, also noch eine Terz höher. Übrigens ist es gerade beim *A* besonders auffallend, wie kleine Verschiedenheiten in der Tonhöhe beträchtlichen Abänderungen in dem Klang des Vokales entsprechen, und ich möchte deshalb Sprachgelehrten für die Definition der Vokale verschiedener Sprachen besonders empfehlen, die Tonhöhe stärkster Resonanz für die Mundhöhle festzustellen.

Bei den bisher genannten Vokalen habe ich keinen zweiten Eigenton auffinden können, auch ist es nach der Analogie der Erscheinungen, welche ähnliche künstlich hergestellte Lufträume zeigen, kaum zu erwarten, daß ein solcher in merklicher Stärke existiert. Später zu beschreibende Versuche werden zeigen, daß die Resonanz dieses einen Tones in der Tat genügt, die genannten Vokale zu charakterisieren.

Die zweite Reihe der Vokale, zu der wir uns wenden, enthält die Folge *A*, *Ä*, *E*, *I*. Die Lippen werden so weit zurückgezogen, daß sie den Luftstrom nicht mehr beengen, dagegen entsteht eine neue Verengerung zwischen dem vorderen Teil der Zunge und dem harten Gaumen, während der Raum unmittelbar über dem Kehlkopf sich dadurch erweitert, daß die Zungenwurzel eingezogen wird, wobei gleichzeitig der Kehlkopf emporsteigt. Die Form der Mundhöhle nähert sich dabei derjenigen einer Flasche mit einem engen Hals.

Der Bauch der Flasche liegt hinten im Schlund, der Hals ist der enge Kanal zwischen der oberen Fläche der Zunge und dem harten Gaumen. In der angegebenen Reihenfolge dieser Buchstaben *Ä*, *E*, *I* nehmen diese Veränderungen zu, so daß beim *I* der Hohlraum der Flasche am größten, der Hals am engsten ist. Beim *Ä* ist der ganze Kanal dagegen noch ziemlich weit, so daß man mit dem Kehlkopfspiegel sehr gut bis in den Kehlkopf hineinsehen kann. Ja, dieser Vokal gibt sogar für die Anwendung dieses Instrumentes die allerbeste Mundstellung, weil die Zungenwurzel, welche beim *A* die Einsicht noch hindert, eingezogen ist und man an ihr vorbeisehen kann.

Wenn man eine mit einem engen Hals versehene Flasche als Resonanzraum anwendet, findet man leicht zwei Töne, von denen der eine angesehen werden kann als Eigenton des Bauches, der andere als ein solcher des Halses der Flasche. Allerdings kann die Luft des Bauches nicht ganz unabhängig von der des Halses schwingen, und die betreffenden eigenen Töne beider Teile müssen deshalb etwas anders, und zwar tiefer ausfallen, als wären Bauch und Hals voneinander getrennt und würden einzeln auf ihre Resonanz geprüft. Der Hals bildet annähernd eine kurze an beiden Enden offene Pfeife. Zwar mündet sein inneres Ende nicht frei in den offenen Luftraum aus, sondern nur in den Hohlraum der Flasche, aber wenn der Hals nur recht eng, der Bauch der Flasche recht weit ist, kann letzterer einigermaßen als offener Raum angesehen werden im Verhältnis zu den Schwingungen der im Hals eingeschlossenen Luft. Diese Bedingung trifft am meisten beim *I* zu; die Länge des Kanales zwischen Zunge und Gaumen von den Oberzähnen bis zum hinteren Rande des knöchernen Gaumens gemessen beträgt etwa 6 cm. Eine offene Pfeife von dieser Länge angeblasen würde den Ton *e''''* geben, während die Beobachtungen für den verstärkten Ton des *I* ungefähr *d''''* ergeben, was so weit übereinstimmt, als man bei der Berechnung der Tonhöhe einer so unregelmäßig gebildeten Pfeife, wie die zwischen Zunge und Gaumen nur irgend erwarten kann.

Die Vokale *Ä*, *E* und *I* haben dementsprechend einen höheren und einen tieferen Resonanzton. Die höheren Töne setzen die aufsteigende Reihe von Eigentönen der Vokale *U*, *O*, *A* fort. Mit Stimmgabeln habe ich für *Ä* den Ton *g'''* bis *as'''* gefunden, für *E* den Ton *b'''*. Für *I* hatte ich keine passende Gabel mehr; man kann

sich aber hier helfen mittels des Luftgeräusches, welches ich gleich nachher besprechen werde, und dieses ergibt ziemlich bestimmt d''''.

Die tieferen Eigentöne, welche der hinteren Abteilung der Mundhöhle angehören, sind etwas schwerer zu bestimmen. Man kann dazu Stimmgabeln anwenden; doch ist die Resonanz verhältnismäßig schwach, weil sie eben durch den langen engen Hals des Luftraumes hindurchgeleitet werden muß. Es ist ferner darauf zu achten, daß diese Resonanz nur eintritt, solange man den betreffenden Vokal mit der Flüsterstimme leise angibt, und schwindet, wenn man schweigt, weil sich im letzteren Fall sogleich die Gestalt der Höhle ändert, von der diese Resonanz abhängt. Man muß auch die angeschlagene Stimmgabel möglichst nahe an die hinter den Oberzähnen gelegene Öffnung des Luftraumes bringen. So fand ich für *Ä* d''', für das *E* f'. Für *I* konnte ich sie nicht direkt mit den Stimmgabeln beobachten; doch schließe ich aus den Obertönen, daß sie etwa so tief wie die des *U* bei f liegt. Wenn man also vom *A* zum *I* übergeht, steigen diese tieferen Eigentöne der Mundhöhle herab, während die höheren aufsteigen.

Bei der dritten Reihe von Vokalen, welche von *A* durch *Ö* nach *Ü* übergeht, haben wir im Inneren des Mundes dieselbe Stellung der Zunge wie für die vorhergehende Reihe. Für das *Ü* nämlich ungefähr dieselbe wie für einen zwischen *E* und *I* in der Mitte gelegenen Vokal, für das *Ö* dagegen dieselbe wie für ein *E*, welches ein wenig nach *Ä* zieht. Außer der Verengerung, welche hier wie bei der zweiten Reihe zwischen Zunge und Gaumen besteht, verengern sich aber auch die Lippen wieder, und zwar so, daß sie sich ebenfalls, so gut sie können, zu einer Röhre formen und somit eine vordere Verlängerung der zwischen Zunge und Gaumen liegenden Röhre bilden. Der Luftraum der Mundhöhle im ganzen ist also auch bei diesen Vokalen einer mit einem Hals versehenen Flasche ähnlich geformt, deren Hals aber länger ist wie bei den Vokalen der zweiten Reihe. Beim *I* fand ich diesen Hals 6 cm lang, beim *Ü* beträgt seine Länge, von dem vorderen Rande der Oberlippe bis zum Anfang des weichen Gaumens gemessen, 8 cm. Die Tonhöhe des höheren Eigentones, welcher der Resonanz des Halses entspricht, muß dadurch ungefähr um eine Quarte tiefer werden als beim *I*. Der Rechnung nach müßte diese Pfeife h''' geben, wenn ihre beiden Enden frei wären; in Wirklichkeit resoniert sie durch eine Stimmgabel, deren Ton zwischen g'''

und *as'''* liegt, wie wir denn auch beim *I* eine solche Abweichung gefunden haben, welche in diesem wie in jenem Falle wohl dadurch zu erklären ist, daß das hintere Ende dieser Röhre zwar in einen erweiterten, aber doch nicht ganz freien Raum ausmündet. Die Resonanz des hinteren Raumes ist nach denselben Regeln zu beobachten, wie bei den Vokalen der *I*-Reihe. Sie findet sich bei *Ö* gleich der von *E*, nämlich *f'*, bei *Ü* gleich der von *I*, nämlich *f*.

Die Tatsache, daß die Mundhöhle bei verschiedenen Vokalen auf verschiedene Tonhöhen abgestimmt sei, ist zuerst von Donders[1]) aufgefunden worden, und zwar nicht mit Hilfe von Stimmgabeln, sondern mittels des Geräusches, welches beim Flüstern der Luftstrom im Munde hervorbringt. Die Mundhöhle wird dabei gleichsam wie eine Orgelpfeife angeblasen und verstärkt durch ihre Resonanz die entsprechenden Töne des Luftgeräusches, welches teils in der verengerten Stimmritze[2]), teils in den vorderen verengten Stellen des Mundes, wenn solche vorhanden sind, hervorgebracht wird. Dabei kommt es allerdings gemeiniglich nicht zu einem vollen Ton; nur beim *Ü* und *Ö* kann das Luftgeräusch ohne merkliche Änderung des Vokals zu einem solchen gesteigert werden, indem man mit dem Munde zu pfeifen beginnt. Beim Sprechen wäre dies aber ein Fehler. Vielmehr tritt gewöhnlich nur dieselbe Art der Verstärkung des Luftgeräusches ein, wie bei einer Orgelpfeife, welche wegen falscher Stellung der Lippe oder ungenügender Windstärke nicht gut anspricht. Doch zeigt ein solches Geräusch, wenn es auch nicht zum vollen musikalischen Ton wird, schon eine ziemlich eng begrenzte Tonhöhe, welche sich durch ein geübtes Ohr bestimmen läßt. Nur irrt man sich, wie in allen solchen Fällen, wo Töne von sehr verschiedener Klangfarbe zu vergleichen sind, leicht in der Oktave. Hat man aber einige von den Tonhöhen, auf die es ankommt, mittels der

[1]) Archiv für die Holländischen Beiträge für Natur- und Heilkunde von Donders und Berlin, 1, 157. Ältere unvollständige Wahrnehmungen über denselben Gegenstand bei Samuel Reyher, Mathesis mosaica, Kiel 1619. — Chr. Hellwag, De formatione loquelae, Diss., Tubingae 1780. — Flörke, Neue Berliner Monatsschrift, September 1803, Februar 1804. — Olivier, Ortho-epo-graphisches Elementarwerk 1804, 3, 21.

[2]) Es ist der hinterste Teil der Stimmritze zwischen den Gießbeckenknorpeln, welcher beim Flüstern als dreieckige Öffnung offen bleibt und die Luft passieren läßt, während die Stimmbänder aneinander gelegt werden.

Resonanz von Stimmgabeln bestimmt, andere, wie *Ü* und *Ö*, dadurch, daß man sie in regelmäßiges Pfeifen überführt, so sind die übrigen leicht zu bestimmen, indem man sie mit den ersteren in melodischer Folge zusammenfügt. So gibt die Folge:

Scharfes *A*, *Ä*, *E*, *I*

d‴ g‴ b‴ d⁗

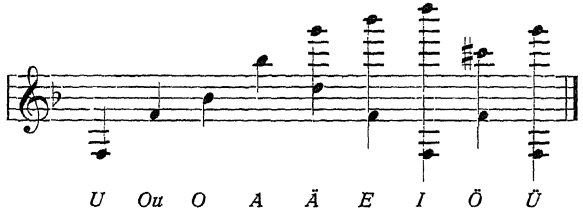
einen aufsteigenden Quartsextenakkord des *g*-Moll-Dreiklanges und läßt sich leicht mit der entsprechenden Tonfolge auf dem Klavier vergleichen. Die Lage des *A*, *Ä* und *E* konnte ich noch mittels der Stimmgabeln bestimmen und dadurch auch die des *I* festsetzen [1]).

Für das *U* ist es ebenfalls nicht ganz leicht, die Resonanzhöhe mittels der Stimmgabel zu finden; die Resonanz ist wegen der kleinen Öffnung des Mundes ziemlich schwach. Hier hat mich ein anderes Phänomen geleitet. Wenn ich von *c* die Skala aufwärts auf den Vokal *U* singe, fühle ich, wie die Erschütterung der Luft im Munde und selbst an den Trommelfellen beider Ohren, wo sie Kitzel erregt, am heftigsten wird, wenn ich bis *f* gelangt bin, vorausgesetzt, daß ich mich bemühe, ein dumpfes *U* festzuhalten, ohne es in *O* übergehen zu lassen. Sobald ich *f* überschreite, ändert sich die Klangfarbe, die starke Erzitterung im Munde und das Kitzeln in den Ohren hört auf. Es ist hier bei der Note *f* ganz dieselbe Erscheinung, als wenn man eine Zunge mit einer kugelförmigen Ansatzröhre verbindet, deren eigener Ton dem der Zunge nahehin entspricht. Auch dann erhält man eine ungemein kräftige Erschütterung der Luft im Inneren der

[1]) Die Angaben von Donders differieren etwas von den meinigen, teils weil sie sich auf die holländische Aussprache beziehen, meine auf die norddeutsche, teils weil Donders, nicht unterstützt durch Stimmgabeln, die Oktave nicht sicher finden konnte, in welche die gehörten Geräusche zu legen sind. Folgende Tafel zeigt diese Abweichungen:

Vokal	Tonhöhe nach Donders	Tonhöhe nach Helmholtz
U	*f′*	*f*
O	*d′*	*b′*
A	*b′*	*b″*
Ö	*g*?	*cis‴*
Ü	*a″*	*g‴ — as‴*
E	*cis‴*	*b‴*
I	*f‴*	*d⁗*

Kugel und einen plötzlichen Sprung in der Klangfarbe, wenn man von einer tieferen Tonhöhe der Luftmasse durch die Tonhöhe des Zungentones hindurch zu einer höheren übergeht. Dadurch bestimmt sich die Resonanz der Mundhöhle für das dumpfe *U* auf die Höhe von *f* noch sicherer als mittels der Stimmgabeln. Aber vielfach wird auch ein *U* mit hellerer Resonanz, dem *O* ähnlicher, gebildet, welches ich mit der französischen Bezeichnung *Ou* versehen will. Dessen Eigenton kann bis *f'* steigen.



Der Einfluß, den die Abstimmung der Mundhöhle auf die Klangfarbe der Stimme hat, ist nun ganz derselbe, welchen wir bei den künstlich konstruierten Zungenpfeifen schon kennen gelernt haben. Es werden nämlich alle diejenigen Obertöne verstärkt, welche mit einem der Eigentöne der Mundhöhle zusammenfallen oder ihm doch nahe genug liegen, während die übrigen Obertöne mehr oder weniger gedämpft werden. Die Dämpfung der nicht verstärkten Töne ist desto auffallender, je enger die Mundhöhle geschlossen ist, entweder zwischen den Lippen wie beim *U*, oder zwischen Zunge und Gaumen wie beim *I* und *Ü*.

Es lassen sich diese Unterschiede in den Obertönen der verschiedenen Vokallaute mittels der Resonatoren sehr leicht und deutlich erkennen, wenigstens soweit es sich um Töne der eingestrichenen und zweigestrichenen Oktave handelt. Man setze z. B. einen Resonator, der auf *b'* abgestimmt ist, an das Ohr und lasse nun eine Baßstimme, welche geübt ist, die Tonhöhe gut festzuhalten und die Vokale richtig zu bilden, auf einen der harmonischen Untertöne des *b'*, sei es *b* oder *es* oder *B*, *Ges*, *Es*, der Reihe nach die Vokale in gleichmäßiger Stärke singen. Man wird finden, daß bei einem reinen volltönenden *O* das *b'* des Resonators mächtig in das Ohr hineinschmettert. Demnächst ist der Oberton in einem scharfen *Ä* und einem Mittelton von *A* und *Ö* noch sehr kräftig, schwächer bei *A*,

E, *Ö*, am schwächsten bei *U* und *I*. Auch findet man leicht, daß die Resonanz des *O* sich merklich schwächt, wenn man es entweder dumpfer macht und dem *U* nähert, oder wenn man es offener bildet, daß es *Å* wird. Nimmt man dagegen den Resonator eine Oktave höher, *b''*, so ist es nun der Vokal *A*, welcher den Resonator am kräftigsten mittönen läßt, während das beim ersten Resonator kräftig wirkende *O* hier eine geringe Wirkung hat.

Für die hohen Obertöne des *Ä*, *E*, *I* lassen sich nun allerdings keine Resonatoren beschaffen, welche eine erhebliche Verstärkung der betreffenden Obertöne zu geben imstande sind. Hier ist man also doch wieder hauptsächlich auf die Beobachtungen des unbewaffneten Ohres angewiesen. Diese Verstärkungstöne in dem Klang der Stimme zu entdecken, hat mir deshalb viel Mühe gekostet, und ich habe sie bei meinen früheren Veröffentlichungen[1]) über diesen Gegenstand noch nicht gekannt. Zu ihrer Beobachtung ist es besser, hohe Töne weiblicher Stimmen oder männlicher Fistelstimmen singen zu lassen. Die Obertöne hoher Noten liegen in der betreffenden Gegend der Skala nicht so nahe aneinander, wie die von tiefen Noten, und man unterscheidet sie deshalb leichter voneinander. Auf dem *b'* z. B. können weibliche Stimmen noch bequem alle Vokale volltönend herausbringen, höher hinauf ist die Auswahl beschränkter. Dann hört man die Duodezime *f'''* bei einem breiten *Ä*, die Doppeloktave *b'''* bei *E*, und die hohe Terz *d''''* bei *I* deutlich, letztere oft sogar recht durchdringend, hervortreten.

Ich bemerke noch, daß die auf der vorigen Seite gegebene Zusammenstellung von Noten sich auf diejenigen Arten der Vokale erstreckt, welche mir den am meisten charakteristischen Klang zu haben scheinen, daß aber auch alle kontinuierlich ineinander übergehenden Zwischenstufen möglich sind, und teils in Dialekten, teils von einzelnen Individuen, teils in besonderen Tonlagen beim Singen oder zur besseren Charakteristik beim Flüstern gebraucht werden.

Daß man die eintönigen Vokale vom *U* durch *O* bis zum scharfen *A* in kontinuierlicher Folge verändern kann, ist leicht zu erkennen und hinreichend bekannt. Ich bemerke dabei noch, da die von mir angegebene tiefe Lage des *U* in Zweifel gezogen ist, daß, wenn ich

[1]) Gelehrte Anzeigen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. 18. Juni 1859. (Wiss. Abh. 1, 397.)

einen auf *f'* ansprechenden Resonator an das Ohr setze, und auf *f* oder *B* als Grundton singend, mir denjenigen *U*-ähnlichen Vokal suche, der die stärkste Resonanz gibt, dies nicht einem dumpfen *U*, sondern einem *O*-ähnlichen *U* entspricht.

Dann sind aber auch Übergänge möglich zwischen den Vokalen der *A-O-U*-Reihe und denen der *A-Ö-Ü*-Reihe, sowie zwischen denen der letzteren und der *A-E-I*-Reihe. Ich kann bei der Stellung für *U* anfangen und den schon verengerten Mund allmählich in die Röhrenform für das *Ö* oder *Ü* überführen, wobei die hohe Resonanz immer deutlicher und zugleich höher wird, je enger die Röhre sich bildet. Macht man diesen Übergang, während man einen Resonator zwischen *b'* und *b''* am Ohr hat, so hört man in einem bestimmten Stadium des Überganges den Ton schwellen, nachher wieder verlöschen. Je höher der Resonator ist, desto mehr muß man sich dem *Ö* oder *Ü* nähern. Bei der betreffenden Mundstellung kann man es dann auch wohl zum Pfeifen auf dem verstärkten Ton bringen. Auch beim ganz leisen Flüstern, wo das Luftgeräusch im Kehlkopf sehr schwach gehalten wird, und bei den Vokalen mit enger Mundöffnung kaum noch hörbar ist, braucht man oft ein verstärktes Reibegeräusch in der Mundöffnung, um den Vokal hörbar zu machen. Das heißt, man macht dann *U* und *I* den verwandten Konsonanten *W* (englisch) und *J* ähnlicher.

Überhaupt erlauben nun die zweitönigen Konsonanten mannigfache Abänderungen, da man jede Höhe des oberen Resonanztones mit jeder Höhe des unteren verbinden kann. Man verfolgt dies am besten, indem man einen Resonator an das Ohr setzt, die entsprechenden Vokalstufen der drei Reihen sucht, die seinen Ton verstärken, und diese nun ineinander überzuführen sucht in der Weise, daß der Resonator fortdauernd verstärkten Ton behält.

So antwortet der Resonator *b'* auf *O*, auf ein *Äö* und auf ein *Ä*-ähnliches *E*, und diese lassen sich kontinuierlich ineinander überführen.

Der Resonator *f'* antwortet auf den Übergang *Ou-Ö-E*. Der Resonator *d''* antwortet auf *Oa-Äö-Ä*. Ähnlich kann auch jeder der höheren Töne mit verschiedenen tieferen verbunden werden. So kann man bei einer Mundstellung, welche *e'''* pfeifend angeben kann, mit unveränderter Tonhöhe des Reibegeräusches in der Öffnung einen mehr *Ö*-ähnlichen oder mehr *Ü*-ähnlichen Laut flüstern, je nachdem

man dem Reibegeräusch des Kehlkopfes dabei höhere oder tiefere Resonanz im hinteren Teile der Mundhöhle gibt [1]).

Noch ist bei der Vergleichung der Stärke der Obertöne verschiedener Vokale mittels der Resonatoren zu erwähnen, daß die Verstärkung durch die Resonanz des Mundes ebenso wie für die Obertöne auch für den Grundton der von der Stimme angegebenen Note gilt. Und da es nun vorzugsweise die Schwingungen des Grundtones sind, welche durch ihre Rückwirkung auf die Stimmbänder diese in regelmäßig schwingender Bewegung erhalten, so spricht die Stimme überhaupt viel kräftiger an, wenn der Grundton einen solchen verstärkenden Einfluß empfängt, was besonders in denjenigen Gegenden der Skala bemerklich wird, welche für die Stimme des Singenden schwer zu erreichen sind. Man bemerkt dasselbe auch bei Zungenpfeifen mit metallenen Zungen. Wenn man solchen ein Ansatzrohr gibt, dessen Resonanz mit dem Ton der Zunge zusammenstimmt oder ein wenig höher liegt, so bekommt man außerordentlich kräftige, vollklingende Töne, zu deren Hervorbringung man starken Druck, aber wenig Luft gebraucht, und wobei die Zunge in großen Exkursionen hin und her schwingt. Die Tonhöhe der Metallzunge wird in Verbindung mit einem solchen Ansatzrohr ein wenig tiefer als vorher, was bei der menschlichen Stimme nicht zu bemerken ist, da der Singende die Spannung seiner Stimmbänder entsprechend regulieren kann. So finde ich namentlich deutlich bei Anwendung eines passenden Resonators, daß ich an der Grenze meiner Fistelstimme auf *b'* die Vokale *O*, *Ä* und ein nach *A* ziehendes *Ö*, die dort ihre Resonanz finden, kräftig singen kann, während *U*, wenn es nicht stark nach *O* gezogen wird, und *I* nur matt und unsicher ansprechen, und dabei doch viel mehr Luft verbrauchen, als die erstgenannten. Bei den Versuchen über die Stärke der Obertöne muß man hierauf Rücksicht nehmen, da die Obertöne eines stark ansprechenden Vokales verhältnismäßig zu stark ausfallen können, denen eines schwach ansprechenden gegenüber. So habe ich gefunden, daß die hohen Soprantöne, welche in das Verstärkungsbereich des Vokales *A* an

[1]) In dieser Weise, scheint mir, erledigen sich einige Einwände, welche Herr G. Engel (in Reicharts und du Bois Reymonds Archiv. 1869, S. 317 bis 319) gemacht hat. Herr J. Stockhausen hat mich darauf aufmerksam gemacht, daß in kurz gesprochenen Silben solche abweichende Vokalfarben gebraucht werden.

der oberen Grenze der zweigestrichenen Oktave fallen, auf diesen Vokal gesungen, ihre höhere Oktave stärker hervortreten lassen, als die weniger gut ansprechenden Vokale *E* und *I* es tun, obgleich die letzteren am oberen Ende der dreigestrichenen Oktave ihre starke Resonanz finden.

Es ist schon oben (S. 67) der Einfluß erwähnt worden, den die Masse und Abgrenzung des mittönenden Körpers auf die Stärke und Breite des Mitschwingens hat. Ein Körper von erheblicher Masse, der seine Schwingungen möglichst frei von allen Hemmungen durch die benachbarten Körper ausführen kann, und dessen Bewegung auch nicht durch innere Reibung seiner Teile gedämpft wird, kann, einmal erregt, lange nachschwingen und fordert deshalb, wenn er in den höchsten Grad des Mitschwingens versetzt werden soll, daß während verhältnismäßig langer Zeit die Oszillationen des erregenden Tones mit denen der in ihm erregten Eigenschwingungen zusammenfallen. Das heißt, der höchste Grad des Mitschwingens ist nur durch zugeleitete Töne von sehr eng begrenzter Tonhöhe zu erreichen. So ist es bei Stimmgabeln und Glocken. Die Luftmasse der Mundhöhle hat nun im Gegenteil geringe Dichtigkeit und Masse, ihre Wände sind, soweit sie von Weichteilen gebildet sind, nicht sehr widerstandsfähig und unvollkommen elastisch, haben bei Erschütterungen viel innere Reibung, wodurch sie Bewegung vernichten. Außerdem kommuniziert die erschütterte Luftmasse der Mundhöhle durch die Mundöffnung mit der äußeren Luft und gibt dieser schnell große Teile ihrer empfangenen Bewegung ab. Eben deshalb erlischt eine einmal erregte schwingende Bewegung in der Luft der Mundhöhle sehr schnell, wie man leicht beobachten kann, wenn man bei verschiedenen Vokalstellungen des Mundes einen Finger gegen die Backe schnellen läßt. Man unterscheidet dann die Tonhöhe der Resonanz recht gut für die verschiedenen Übergangsstufen des *O* einerseits nach *U* und andererseits nach *A* hin. Aber der Ton ist sehr kurz verklingend. Auch durch Klappern an den Zähnen kann man die verschiedene Resonanz der Mundhöhle hörbar machen. Eben deshalb kann auch ein Ton, der nur für die wenigen Schwingungen eines solchen kurzen Resonanztones nahehin übereinstimmend oszilliert, eine Verstärkung durch Mittönen finden, die nicht viel geringer ausfällt als für einen genau übereinstimmenden Ton; und die Breite in der Skala, deren Töne durch eine gegebene Stellung des Mundes merklich verstärkt werden können, ist eine ziem-

lich erhebliche[1]). Dies wird durch den Versuch bestätigt. Wenn ich einen Resonator für *b'* an das rechte und einen für *f''* an das linke Ohr setze und auf *B* den Vokal *O* singe, so ist nicht bloß der vierte Partialton *b'*, der dem Eigenton der Mundhöhle entspricht, verstärkt, sondern ganz merklich, wenn auch bedeutend weniger als der genannte, auch der sechste *f''*. Wenn ich dann das *O* in ein *Å* verwandle, bis das *f''* seine stärkste Resonanz findet, so schwindet dabei doch auch die Verstärkung des *b'* nicht ganz, wenn sie auch viel geringer wird.

Die Stellung der Mundhöhle beim *O* bis *Oa* scheint diejenige zu sein, welche für die Andauer ihres Eigentones und die Entstehung einer auf enge Grenzen der Tonhöhe beschränkten Resonanz verhältnismäßig am günstigsten erscheint. Wenigstens ist hierbei, wie ich schon oben bemerkte, die Verstärkung eines passenden Stimmgabeltones am kräftigsten, und Klopfen gegen die Backen oder die Lippen gibt den deutlichsten Ton. Wenn also beim *O* die verstärkende Resonanz noch bis zur Entfernung einer Quinte sich merklich macht, so wird für die übrigen Vokale dasselbe noch in höherem Grade der Fall sein. In der Tat ergeben dies auch die Versuche. Wenn man irgend einen Resonator an das Ohr setzt, einen passenden harmonischen Unterton desselben sucht, und dann die verschiedenen Vokale auf diesen singt, indem man einen in den anderen übergehen läßt, so findet man die größten Verstärkungen der Resonanz für denjenigen oder diejenigen Vokale, für welche einer der charakteristischen Töne nach der oben gegebenen Tabelle mit dem Eigenton des Resonators zusammenfällt. Aber man bemerkt mehr oder weniger erhebliche Verstärkung auch für solche Vokale, deren charakteristische Töne mäßige Höhenunterschiede von dem Eigenton des Resonators haben, desto geringere, je größer die Differenz dieser Tonhöhen ist.

Dadurch wird es nun möglich, im allgemeinen die Vokale voneinander zu scheiden, auch wenn die Höhe des Stimmtones nicht gerade einem harmonischen Unterton des Vokales entspricht. Vom zweiten Partialton ab sind die Intervalle derselben enge genug, daß einer oder zwei derselben eine deutliche Verstärkung durch die Resonanz des Mundes finden müssen. Nur wenn der Eigenton der Mundhöhle in die Mitte des Intervalles zwischen Grundton der Stimme und dessen

[1]) Siehe hierfür auch Beilage X und die dazugehörigen Erörterungen im Text der Abtl. I, Abschn. 6.

höhere Oktave fällt, oder um mehr als eine Quinte tiefer als jener Grundton ist, wird die charakteristische Resonanz schwach werden müssen.

Beim Sprechen wählen nun beide Geschlechter eine der tiefsten Lagen ihrer Stimme. Die Männer brauchen in der Regel die obere Hälfte der großen Oktave, die Frauen die obere Hälfte der kleinen. Mit Ausnahme des *U*, dessen Klangfarbe Schwankungen des Eigentones fast in Breite einer Oktave zuläßt, fallen für die genannten Lagen der Sprechstimme alle Eigentöne der Mundhöhle zwischen hinreichend enge Intervalle der Obertöne des Sprechtones, um merkliche Resonanz von einem oder mehreren dieser Obertöne zu erzeugen und den Vokal zu charakterisieren. Dazu kommt, daß der Sprechstimme wahrscheinlich durch stärkeren Druck der Stimmbänder gegeneinander, wobei sie aufschlagende Zungen bilden, eine knarrendere Klangfarbe, das heißt stärkere Obertöne gegeben werden, als der Singstimme.

Beim Singen dagegen und namentlich beim Singen in höheren Lagen werden die Verhältnisse ungünstiger für die Charakterisierung der Vokale. Jedermann weiß übrigens, daß es im allgemeinen viel schwerer ist, gesungene Worte zu verstehen, als gesprochene, und daß die Schwierigkeit bei Männerstimmen geringer ist, als bei Frauenstimmen, gleich gute Schulung der Stimme vorausgesetzt. Man würde zu Opern und Oratorien nicht Textbücher verkaufen, wenn es anders wäre. Oberhalb des *f'* wird die Charakterisierung des *U*, selbst wenn es dem *O* stark verähnlicht wird, unvollkommen werden. Solange es aber der einzige unbestimmt klingende Vokal ist und die anderen noch merkliche Verstärkung gewisser Regionen ihrer Obertonreihe hören lassen, wird dieser negative Charakter das *U* auszeichnen. Für Soprane wird dagegen in der Gegend des *f''* die Unterscheidung des *U*, *O* und *A* undeutlich werden müssen, was meiner Erfahrung nach in der Tat der Fall ist. Singt man die drei Vokale in unmittelbarer Folge nebeneinander, so wird sich die Resonanz des *f'''* beim *A* in der auf *b''* gestimmten Mundhöhle immer noch etwas mehr geltend machen können, als bei der Stimmung *b'* für *O*. Auch wird die Sängerin in diesem Falle das *A* heller machen können, indem sie die Stimmung der Mundhöhle gegen *d'''* steigert und dadurch dem *f'''* nähert. Das *O* wird sich dagegen durch Annäherung an das *Oa* vom *U* scheiden lassen, indem dabei der Grundton entschiedenere Verstärkung erhalten wird. Aber immerhin werden diese Vokale, wenn

sie nicht unmittelbar nebeneinander gestellt sind, für einen Hörer, der die Art der Vokalbildung der betreffenden Sängerin noch nicht kennt, nicht sehr deutlich unterschieden sein.

Ein weiteres dabei in Betracht kommendes Hilfsmittel liegt übrigens noch in einem kräftigen ersten Einsatz des betreffenden Vokales. Dies beruht auf einem allgemeinen Verhalten der zum Mittönen erregten Körper. Wenn man nämlich das Mitschwingen eines dazu fähigen Körpers durch einen von seinem Eigenton etwas abweichenden Ton so erregt, daß man diesen Ton plötzlich mit voller Stärke einsetzen läßt, so hört man anfangs neben dem durch die Resonanz verstärkten, erregenden Ton auch den Eigenton des mittönenden Körpers[1]). Aber der letztere verklingt bald, während der erstere stehen bleibt. Bei Stimmgabeln mit großen Resonatoren hört man sogar Schwebungen zwischen beiden Tönen. Bringt man nun einen Resonator an das Ohr etwa für *b'* und setzt den Vokal *O* kräftig auf *g* ein, dessen Obertöne *g'* und *d''* nur schwache dauernde Resonanz in der Mundhöhle finden, so hört man unmittelbar beim Einsatz doch das *b'* der Mundhöhle und des Resonators als einen kurzen Tonstoß aufblitzen. Wählt man einen anderen Vokal, so schwindet dieses *b'*, woraus folgt, daß die Abstimmung der Mundhöhle bei seiner Erzeugung mitwirkt. Also auch hier erregt der plötzliche Einsatz der dem Stimmklang angehörigen Töne *g'* und *d''* schnell verklingend den dazwischen liegenden Eigenton der Mundhöhle *b'*. Dasselbe kann man bei anderen Tonhöhen des angesetzten Resonators beobachten, wenn man Noten, kräftig einsetzend, singt, deren Obertöne nicht durch den Resonator verstärkt werden, sobald man einen Vokal wählt, dessen charakteristische Tonhöhe der des Resonators entspricht. Daraus ergibt sich, daß bei scharfem Einsatz jedes Vokales in jeder Tonhöhe der charakteristische Ton desselben als kurzer Tonstoß hörbar wird. Dadurch wird der Vokal im Moment des Einsetzens deutlich charakterisiert werden können, selbst wenn er beim längeren Forttönen unbestimmt werden sollte. Nur ist hierzu, wie bemerkt, ein präziser und energischer Einsatz nötig. Wie sehr übrigens ein solcher für die Verständlichkeit der Worte eines Singenden vorteilhaft ist, ist bekannt. Eben deshalb ist auch wohl die Vokalisation der kurz an-

[1]) Siehe die mathematische Darstellung dieses Vorganges in Beilage IX in den Bemerkungen zu Gleichung 4 bis 4 b.

gegebenen Worte des rezitativischen Parlando deutlicher, als die des getragenen Gesanges [1]).

Übrigens erlauben die Vokale noch anderweitige Abänderungen ihrer Klangfarbe, außer den vorher schon besprochenen, durch Veränderungen ihrer charakteristischen Töne innerhalb gewisser Breite bedingten. Es kann nämlich die Resonanzfähigkeit der Mundhöhle überhaupt Abänderungen ihrer Stärke und Bestimmtheit erleiden, und dadurch der Charakter der verschiedenen Vokale, ihr Unterschied voneinander überhaupt mehr hervorgehoben oder mehr verwischt werden. Im allgemeinen sind schlaffe weiche Wände eines Kanales mit tönenden Luftmassen nachteilig für die Kraft der Schwingungen. Teils wird durch die weichen Massen zu viel von der Bewegung nach außen hin abgegeben, teils in ihrem Inneren durch Reibung vernichtet. Haben doch selbst hölzerne Orgelpfeifen einen weniger energischen Klang als metallene, und solche von Pappe einen noch stumpferen, selbst wenn das Mundstück unverändert bleibt. Die Wandungen des menschlichen Halses und die Wangen sind aber noch viel nachgiebiger als Pappe. Soll also der Stimmton mit allen seinen Obertönen kräftige Resonanz finden und möglichst ungeschwächt nach außen dringen, so müssen diese schlaffsten Teile unseres Stimmkanales möglichst außer Spiel gesetzt oder durch Spannung elastisch gemacht, und andererseits der Kanal möglichst kurz und weit gebildet werden. Dies letztere geschieht durch Hebung des Kehlkopfes. Die schlaffe Wand der Wangen kann fast ganz beseitigt werden, wenn die Zahnreihen nicht zu weit voneinander entfernt werden. Die Lippen können, wenn sie nicht notwendig mitwirken müssen, wie für *Ö* und *Ü*, so weit zurückgezogen werden, daß die scharfen festen Zahnränder den Ausgang der Mundhöhle begrenzen. Zugleich können die Mundwinkel beim *A* ganz zur Seite gezogen werden, beim *O* durch Spannung der von oben und unten an sie tretenden Muskeln (Levator anguli oris und Triangularis menti), die man alsdann beim Betasten als gespannte Stränge fühlt, fest gespannt und an die Zahnreihen angedrückt werden, so daß auch dieser Teil des Randes der Mundöffnung scharf und widerstandsfähig wird.

[1]) Durch die hier besprochenen Tatsachen sind, wie ich glaube, die von Herrn E. v. Qvanten (Pogg. Ann. **154**, *272* und 522) gegen die Theorie der Vokale vorgebrachten Bedenken erledigt, soweit dieselben nicht auf Mißverständnissen beruhen.

Bei dem Versuch, einen klaren und energischen Stimmton hervorzubringen, fühlt man aber auch Spannung einer großen Anzahl der vorn am Hals gelegenen Muskeln, sowohl derjenigen (Mylohyoideus, Geniohyoideus und vielleicht auch Biventer), welche zwischen Unterkiefer und Zungenbein liegen und den unteren Schluß der Mundhöhle bilden helfen, als derer, welche neben Kehlkopf und Luftröhre hinablaufen und das Zungenbein nach unten ziehen (Sternohyoideus, Sternothyreoideus und Thyreohyoideus). Ohne die Gegenwirkung der letzteren wäre nämlich eine erhebliche Spannung der ersteren nicht möglich. Außerdem deutet eine beim Stimmansatz entstehende Einziehung der Haut an beiden Seiten des Kehlkopfes an, daß auch der vom Zungenbein schräg abwärts nach hinten zum Schulterblatt laufende Omohyoideus gespannt wird. Ohne seine Mitwirkung würden die vom Unterkiefer und Brustbein kommenden Muskeln den Kehlkopf zu sehr nach vorn ziehen. Nun gehen die meisten dieser Muskeln gar nicht an den Kehlkopf, sondern an das Zungenbein, an welchem der Kehlkopf aufgehängt ist. Sie können also auch die Stimmbildung selbst nicht direkt unterstützen, soweit diese von der Aktion des Kehlkopfes abhängt. Die Aktion dieser Muskeln, soweit ich sie an mir selbst beobachten kann, ist auch viel geringer, wenn ich ein dumpfes gutturales *A* hervorbringe, als wenn ich dieses in ein etwas schmetterndes, scharf und kräftig hervordringendes zu verwandeln suche. Schmetternder, scharfer Klang heißt Klang mit vielen und starken Obertönen; je stärker diese überhaupt sind, desto deutlicher treten natürlich auch die durch ihre Differenzen bedingten Unterschiede der Vokale hervor. Ein Sänger und Deklamator wird neben der ausgiebigen hellen Stimmbildung gelegentlich auch die dumpfere als Gegensatz benutzen können. Scharfe Charakterisierung des Klanges paßt für energische, freudige oder tatkräftige Stimmungen, indifferentere, dumpfere Klangbildung für trübe, in sich verschlossene. Im letzteren Falle ändert man auch gern die Eigentöne der Vokale, indem man die extrem gelegenen mehr einem mittleren *Ä ö* (etwa dem kurzen *E* der Deutschen entsprechend) nähert, also namentlich die hohen Töne des *A*, *E*, *I* etwas tiefer wählt.

Einen eigentümlichen Umstand muß ich hier noch erwähnen, durch welchen die menschliche Stimme sich vor anderen musikalischen Instrumenten auszeichnet und eine eigentümliche Beziehung zum

menschlichen Ohr zeigt. Oberhalb der hohen Verstärkungstöne für das *I* in der Gegend des *e''''* bis *g''''* klingen die Töne der Klaviere eigentümlich scharf, und man wird leicht zu dem Glauben verleitet, daß diese hohen Töne zu harte Hämmer haben, oder in ihrer Mechanik von ihren Nachbarn irgendwie abweichen. Indessen ist die Sache bei allen Klavieren die gleiche, und wenn man eine ganz kleine Glasröhre oder Glaskugel an das Ohr setzt, so werden die früher scharfen Töne der Skala mild und schwach wie die anderen, während eine andere tiefer gelegene Reihe von Tönen jetzt stärker und schärfer hervortritt. Daraus folgt, daß das menschliche Ohr selbst durch seine Resonanz die Töne zwischen *e''''* und *g''''* begünstigt, daß es selbst für einen dieser Töne abgestimmt ist[1]). Empfindlichen Ohren erregen jene Töne auch wohl Schmerz. Dadurch treten nun die Obertöne dieser Lage, wenn sie so hoch hinaufreichen, besonders kräftig hervor und affizieren das Ohr sehr stark. Das geschieht bei der menschlichen Stimme im allgemeinen, wenn sie mit Anstrengung gebraucht wird, so daß sie einen schmetternden Charakter bekommt. Bei kräftigen Männerstimmen, welche forte singen, hört man jene Töne gleichsam wie ein helles Schellengerassel mitklingen, am deutlichsten aber bei Chören, wenn die Stimmen etwas schreien. Es gibt jede einzelne Männerstimme in solcher Höhe schon dissonierende Obertöne. Wenn Bässe ihr hohes *e'* singen, so ist *d''''* der siebente, *e''''* der achte, *fis''''* der neunte, *gis''''* der zehnte Oberton. Wenn nun gleichzeitig *e''''* und *fis''''* stark, *d''''* und *gis''''* schwächer hörbar werden, so gibt das natürlich eine scharfe Dissonanz. Kommen gar viele Stimmen zusammen, welche diese Töne mit kleinen Höhenunterschieden angeben, so gibt es eine eigentümliche Art von Gerassel, was man sehr leicht immer wieder wahrnimmt, wenn man erst einmal darauf aufmerksam geworden ist. Einen Unterschied der Vokale habe ich dabei nicht wahrgenommen, wohl aber hört das Rasseln auf, wenn die Stimmen piano gebraucht werden, obgleich dabei die Tonstärke eines Chores immer noch eine ziemlich bedeutende sein kann. Es ist diese Art

[1]) Neuerdings finde ich, daß mein rechtes Ohr meistens für *f''''* und das linke für *c''''* empfindlich ist. Wenn ich Luft in die Trommelhöhle eintreibe, geht die Resonanz herab auf *cis''''* und *gis'''*. Der Ton der Grillen entspricht gerade dem höheren Resonanzton, und wenn ich nur ein kurzes Papierröhrchen an den Gehörgang anfüge, wird das Zirpen der Grillen auffallend schwächer gehört.

von Rasseln eine Eigentümlichkeit der menschlichen Stimmen, die Orchesterinstrumente bringen es nicht in derselben Weise so deutlich und stark hervor. Ich habe es überhaupt von keinem anderen Tonwerkzeuge je so deutlich gehört, wie von menschlichen Stimmen.

Auch in den Sopranstimmen, wenn sie forte singen, hört man dieselben Obertöne; bei scharfen und unsicheren Stimmen sind sie tremulierend und bekommen dadurch etwas Ähnlichkeit mit dem Gerassel, welches sie in den Klängen der Männerstimmen bilden. Von recht sicheren und wohlklingenden Frauenstimmen und von einigen ausgezeichneten Tenorstimmen habe ich sie aber auch schon ganz rein und ruhig fortklingend gehört. Beim melodischen Fortschritt der Singstimme höre ich dann diese hohen Töne der viergestrichenen Oktave bald etwas abwärts, bald aufwärts schreitend innerhalb des Umfanges einer kleinen Terz, je nachdem verschiedene Obertöne der gesungenen Noten in das Gebiet einrücken, für welches unser Ohr so empfindlich ist. Auffallend ist es aber, daß gerade die menschliche Stimme so reich ist an Obertönen, für welche das menschliche Ohr so empfindlich ist. Übrigens bemerkt Frau E. Seiler, daß auch Hunde gegen das hohe *e* der Violine sehr empfindlich sind.

Diese erwähnte Verstärkung der in der Mitte der viergestrichenen Oktave gelegenen Töne hat übrigens mit der Charakteristik der Vokale nichts zu tun; ich habe sie hier nur deshalb erwähnt, weil man die genannten hohen Töne bei Untersuchungen über die Klangfarbe der Vokale und der menschlichen Stimmen leicht bemerkt und man sich nicht verleiten lassen darf, in ihnen eine besondere Charakteristik einzelner Vokale zu suchen. Sie sind nur eine Charakteristik der angestrengten Stimme.

An das *U* schließt sich noch an der brummende Ton, der entsteht, wenn man mit geschlossenem Munde singt. Dieser brummende Ton wird beim Ansatz der Konsonanten *M*, *N* und *N G* gebraucht. Die Nasenhöhle, welche hierbei für den Ausgang des Luftstromes dient, hat im Verhältnis zur Größe ihrer Höhlung eine noch engere Öffnung, als die Mundhöhle beim Vokal *U*. Beim Brummen eines Tones treten deshalb die Eigentümlichkeiten des *U* in noch gesteigertem Maße auf. Nämlich obgleich noch Obertöne da sind, und sogar ziemlich hoch hinaufreichen, so nehmen sie nach der Höhe hin noch viel schneller an Stärke ab als beim *U*. Die höhere Oktave

des Grundtones hat beim Brummen noch ziemliche Stärke, alle höheren Partialtöne sind aber schwach. Das Brummen in der Mundstellung für *M* und *N* unterscheidet sich noch ein wenig in der Klangfarbe, indem beim *N* die Obertöne weniger gedämpft sind als beim *M*. Aber ein deutlicher Unterschied dieser Konsonanten entsteht doch erst im Moment, wo die Mundhöhle geöffnet oder geschlossen wird. Auf die Zusammensetzung des Schalles der übrigen Konsonanten können wir hier nicht näher eingehen, weil sie Geräusche ohne konstante Tonhöhe geben, nicht musikalische Klänge, und wir uns hier zunächst auf die letzteren beschränken müssen.

Die hier auseinander gesetzte Theorie der Vokallaute läßt sich bestätigen durch Versuche mit künstlichen Zungenpfeifen, an welche man passende Ansatzröhren anbringt. Es geschah dies zuerst durch Willis, welcher Zungenpfeifen mit zylindrischen Ansatzröhren von veränderlicher Länge verband, und durch Verlängerung des Ansatzrohres verschiedene Töne hervorbrachte. Die kürzesten Röhren gaben ihm *I*, dann *E*, *A*, *O*, schließlich *U*, bis die Röhre die Länge einer Viertel-Wellenlänge überschritt. Bei weiterer Verlängerung kehrten die Vokale in umgekehrter Ordnung wieder. Seine Bestimmung der Tonhöhe der resonierenden Pfeifen stimmt für die tieferen Vokale gut mit der meinigen überein. Für die höheren Vokale hat Willis aber wohl relativ zu hohe Töne gefunden, weil dann die Wellenlängen kleiner als der Durchmesser der Röhre wurden, und deshalb die gewöhnliche Berechnung der Tonhöhe nach der Länge der Röhre allein nicht mehr anwendbar war. Auch waren notwendig die Vokale *E* und *I* denen des Mundes ziemlich unähnlich, wegen Mangels der zweiten Resonanz und deshalb, wie Willis selbst angibt, nicht eben gut voneinander abzutrennen.

Vokal	Im Worte	Tonhöhe nach Willis	Tonhöhe nach Helmholtz
O	*No*	*c''*	*c''*
A O	*Nought*	*es''*	*es''*
	Paw	*g''*	*g''*
A	*Part*	*des'''*	*des'''*
	Paa	*f'''*	
E	*Pay*	*d'''*	*b'''*
	Pet	*c''''*	*c''''*
I	*See*	*g''''*	*d''''*

Noch besser und deutlicher als mit zylindrischen Röhren erhält man die Vokale, wenn man abgestimmte kugelförmige Hohlräume anwendet. Wenn ich auf eine Zungenpfeife, welche *b* gab, die gläserne Resonanzkugel für *b* aufsetzte, so erhielt ich den Vokal *U*, mit der Kugel *b'* erhielt ich *O*, mit der Kugel *b''* dagegen *A*, ein wenig geschlossen, mit *d'''* ein scharfes *A*. Bei gleicher Abstimmung der angesetzten Hohlräume erhalten wir daher auch dieselben Vokale ganz unabhängig von ihrer Form und Wandung. Auch ist es mir gelungen, mit derselben Zungenpfeife verschiedene Abstufungen von *Ä*, *Ö*, *E* und *I* hervorzubringen, indem ich gläserne Hohlkugeln aufsetzte, in deren äußere Öffnung noch ein 6 bis 10 cm langes Glasröhrchen eingefügt war, um die doppelte Resonanz der Mundhöhle bei diesen Vokalen nachzubilden.

Willis hat noch eine andere interessante Methode angegeben, Vokale hervorzubringen. Wenn man ein Zahnrad mit vielen Zähnen schnell umdreht und an seinem gezahnten Rande eine Feder schleifen läßt, so wird die Feder von jedem Zahn gehoben, und man erhält dadurch einen Ton, dessen Schwingungszahl gleich der Zahl der vorübergehenden Zähne ist. Nun gibt aber die Feder selbst, wenn sie an ihrem einen Ende gut befestigt ist und in Schwingung versetzt wird, einen Ton, der desto höher steigt, je kürzer die Feder gemacht wird. Läßt man nun die Feder schleifen, während das Rad mit gleichbleibender Geschwindigkeit gedreht wird, und verändert dann die Länge der Feder, so erhält man bei langer Feder einen *U*-ähnlichen Klang, bei kürzerer *O*, *A*, *E*, *I*, indem der Ton der Uhrfeder hierbei die Rolle des verstärkten Vokaltones spielt. Doch ist diese Nachahmung der Vokale allerdings viel unvollkommener als die mittels der Zungenpfeifen. Aber der Sinn auch dieses Verfahrens beruht offenbar darin, daß Klänge hervorgebracht werden, in denen gewisse Obertöne, die nämlich, welche dem eigenen Ton der anschlagenden Feder entsprechen, verstärkt werden.

Willis selbst hat eine andere Theorie von der Natur der Vokalklänge aufgestellt, als wir es hier dem Zusammenhang aller übrigen akustischen Erscheinungen entsprechend getan haben. Willis stellt sich vor, daß die Luftstöße, welche den Klang der Vokale hervorbringen, selbst schon schnell verhallende Töne sind, entsprechend dem Eigenton der Feder in seinem letzten Versuch oder dem kurzen

Widerhall, welchen ein Stoß oder eine kleine Luftexplosion in der Mundhöhle, bzw. im Ansatzrohr einer Zungenpfeife hervorbringt. In der Tat hört man etwas dem Vokalklang Ähnliches, wenn man auch nur mit einem Stäbchen an den Zähnen klappert, während man die Mundhöhle in die Stellung der verschiedenen Vokale formt. Willis Beschreibung der Schallbewegung bei den Vokalen trifft jedenfalls mit der Wirklichkeit ziemlich nahe zusammen; aber sie gibt nur die Art und Weise an, wie die Bewegung in der Luft geschieht, und nicht die entsprechende Reaktion des Ohres gegen diese Bewegung. Daß auch diese Art der Bewegung vom Ohr nach den Gesetzen des Mittönens in eine Reihe von Obertönen zerlegt wird, zeigt sich in der übereinstimmenden Analyse des Vokalklanges, wie sie vom unbewaffneten Ohr und von den Resonatoren ausgeführt wird. Dasselbe wird sich noch deutlicher im nächsten Abschnitt bei der Beschreibung derjenigen Versuche zeigen, in welchen Vokalklänge direkt aus ihren Obertönen zusammengesetzt werden.

Die Vokalklänge unterscheiden sich von den Klängen der meisten anderen musikalischen Instrumente also wesentlich dadurch, daß die Stärke ihrer Obertöne nicht nur von der Ordnungszahl derselben, sondern überwiegend von deren absoluter Tonhöhe abhängt. Wenn ich z. B. den Vokal *A* auf die Note *Es* singe, ist der verstärkte Ton *b''* der zwölfte des Klanges, und wenn ich denselben Vokal auf die Note *b'* singe, ist es der zweite Ton des Klanges, welcher verstärkt wird.

Wir können aus den angeführten Beispielen über die Abhängigkeit der Klangfarbe von der Zusammensetzung des Klanges im allgemeinen folgende Regeln ziehen:

1. Einfache Töne, wie die der Stimmgabeln mit Resonanzröhren, der weiten gedackten Orgelpfeifen, klingen sehr weich und angenehm, ohne alle Rauhigkeit, aber unkräftig und in der Tiefe dumpf.

2. Klänge, welche von einer Reihe ihrer niederen Obertöne bis etwa zum sechsten hinauf in mäßiger Stärke begleitet sind, sind klangvoller, musikalischer. Sie haben, mit den einfachen Tönen verglichen, etwas Reicheres und Prächtigeres, sind aber vollkommen wohllautend und weich, solange die höheren Obertöne fehlen. Hierher gehören die Klänge des Klaviers, der offenen Orgelpfeifen, die weicheren Pianotöne der menschlichen Stimme und des Hornes, welche letzteren

den Übergang zu den Klängen mit hohen Obertönen bilden, während die Flöten und schwach angeblasenen Flötenregister der Orgel sich den einfachen Tönen nähern.

3. Wenn nur die ungeradzahligen Obertöne da sind, wie bei den engen gedackten Orgelpfeifen, den in der Mitte angeschlagenen Klaviersaiten und der Klarinette, so bekommt der Klang einen hohlen oder bei einer größeren Zahl von Obertönen einen näselnden Charakter. Wenn der Grundton an Stärke überwiegt, ist der Klang voll; leer dagegen, wenn jener an Stärke den Obertönen nicht hinreichend überlegen ist. So ist der Klang weiter offener Orgelpfeifen voller als der von engeren, der Klang der Saiten voller, wenn sie mit den Hämmern des Pianoforte angeschlagen werden, als wenn es mit einem Stöckchen geschieht oder wenn sie mit den Fingern gerissen werden, der Ton von Zungenpfeifen mit passendem Ansatz voller als von solchen ohne Ansatzrohr.

4. Wenn die höheren Obertöne jenseits des sechsten oder siebenten sehr deutlich sind, wird der Klang scharf und rauh. Den Grund davon werden wir später in den Dissonanzen nachweisen, welche die höheren Obertöne miteinander bilden. Der Grad der Schärfe kann verschieden sein; bei geringerer Stärke beeinträchtigen die hohen Obertöne die musikalische Brauchbarkeit nicht wesentlich, sind im Gegenteil günstig für die Charakteristik und Ausdrucksfähigkeit der Musik. Von dieser Art sind besonders wichtig die Klänge der Streichinstrumente, ferner die meisten Zungenpfeifen, Oboe, Fagott, Physharmonika, menschliche Stimme. Die rauheren, schmetternden Klänge der Blechinstrumente sind außerordentlich durchdringend und machen deshalb mehr den Eindruck großer Kraft als ähnliche Klänge von weicherer Klangfarbe. Sie sind deshalb für sich allein wenig geeignet zur künstlerischen Musik, aber von großer Wirkung im Orchester. In welcher Weise die hohen dissonierenden Obertöne den Klang durchdringender machen können, wird sich später ergeben.

Sechster Abschnitt.

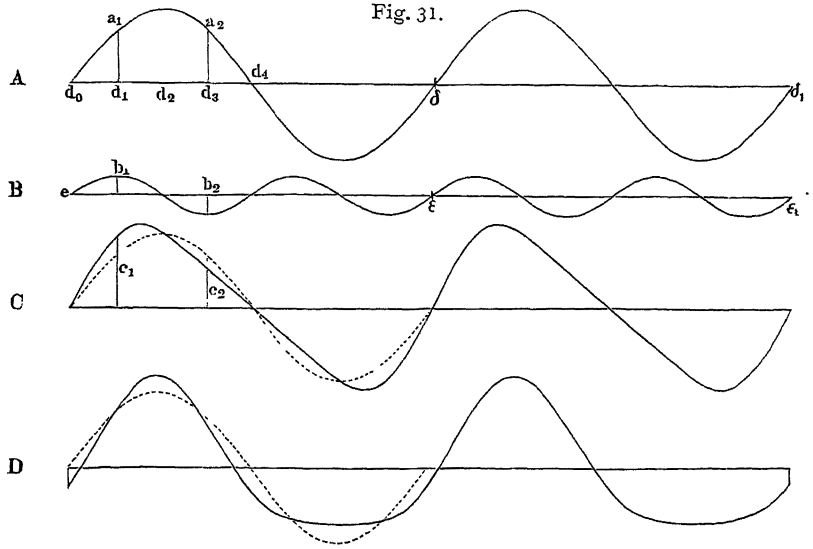
Über die Wahrnehmung der Klangfarben.

Wir haben bisher nur gegebene Klänge zu analysieren gesucht, indem wir bestimmten, welche Unterschiede in der Zahl und Stärke ihrer Obertöne sie darbieten. Ehe wir die Rolle des Ohres bei der Auffassung der Klangfarbe genauer bestimmen können, ist es nun nötig, zu untersuchen, ob für die Wahrnehmung einer bestimmten musikalischen Klangfarbe es ausreicht, daß die Obertöne eine bestimmte Stärke haben, oder ob auch von dieser unabhängig noch andere Unterschiede der Klangfarbe existieren und wahrgenommen werden können. Da wir uns zunächst nur mit musikalischen Klängen beschäftigen, d. h. solchen, die durch eine genau periodische Luftbewegung hervorgebracht werden und alle unregelmäßigen Luftbewegungen, die als Geräusch erscheinen, ausschließen, so läßt diese Frage eine noch bestimmtere Begrenzung zu. Denken wir uns nämlich die Luftbewegung des gegebenen Klanges zerlegt in eine Summe von pendelartigen Luftschwingungen, so ist nicht nur die Stärke aller dieser einzelnen pendelartigen Schwingungen nach der Form der Gesamtbewegung verschieden, sondern auch ihre Stellung zueinander, nach physikalischem Ausdruck, ihr Phasenunterschied. Setzen wir z. B. die beiden pendelartigen Schwingungen *A* und *B*, Fig. 31, zusammen, so daß einmal der Punkt *e* der Kurve *B* gelegt wird auf den Punkt d_0 der Kurve *A*, dann auf d_1, so erhalten wir die beiden ganz verschiedenen Schwingungsformen *C* und *D*. Durch Verlegung des Anfangspunktes *e* auf d_2 oder d_3 erhalten wir noch andere Formen, welche Umkehrungen der Formen *C* und *D* sind, wie schon oben S. 52 erörtert ist. Wenn nun die Klangfarbe nur von der Stärke der Obertöne abhängt, so müssen die Bewegungen *CD* usw. alle auf das Ohr genau den gleichen Eindruck machen. Wenn es aber auch

auf die Stellung der beiden Wellen zueinander, oder auf ihren Phasenunterschied ankommt, so werden sie verschiedenen Eindruck auf das Ohr machen.

Um nun darüber zu entscheiden, ob dies der Fall sei oder nicht, war es nötig, verschiedene Klänge geradezu aus einfachen Tönen zusammenzusetzen und zu sehen, ob die Abänderung des Phasenunterschiedes bei gleichbleibender Stärke der Obertöne Änderungen des Klanges zur Folge hat. Einfache Töne von großer Reinheit, die in ihrer Stärke und ihrem Phasenunterschied genau reguliert werden

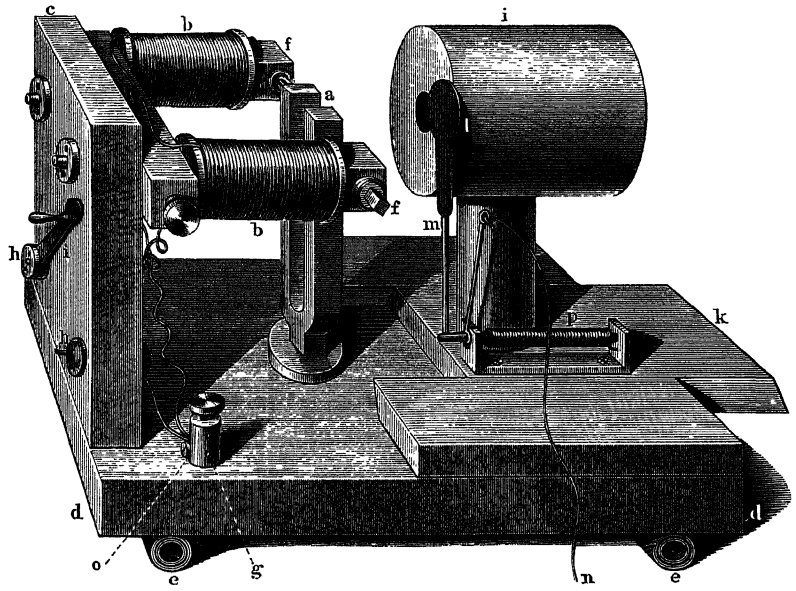
Fig. 31.



können, erhält man am besten durch Stimmgabeln, deren Ton durch eine Resonanzröhre, wie es schon früher beschrieben ist, verstärkt und an die Luftmasse übertragen wird. Um die Stimmgabeln dauernd in eine sehr gleichmäßige Bewegung zu versetzen, wurden sie zwischen die Schenkel kleiner Elektromagnete gestellt, in der Weise, wie in Fig. 32 abgebildet ist. Eine jede Stimmgabel *a* war in ein besonderes Brettchen *dd* eingeschraubt, welches auf untergeklebten Stückchen von Gummischläuchen *ee* ruhte, um zu verhindern, daß die Schwingungen der Gabel direkt an den Tisch übertragen und dadurch hörbar würden. Die mit Drahtwindungen umgebenen Schenkel des Elektromagneten sind mit *bb* bezeichnet, seine Pole, die der Stimm-

gabel zugewendet sind, mit *f*. Auf dem horizontalen Brettchen *dd* befinden sich zwei Klemmschrauben *g*, die mit den Drahtwindungen des Elektromagneten in leitender Verbindung stehen und dazu dienen, andere Drähte aufzunehmen, durch welche elektrische Ströme zugeleitet werden können. Um die Gabeln in lebhafte Schwingung zu versetzen, müssen diese Ströme von periodisch wechselnder Stärke

Fig. 32.



sein. Zu ihrer Erzeugung dient ein besonderer Apparat, welcher unten beschrieben werden wird.

Wenn bei dieser Einrichtung die Gabeln in Schwingung versetzt werden, hört man außerordentlich wenig von ihrem Ton, weil sie wenig Gelegenheit haben, ihre Schwingungen der Luftmasse oder den umliegenden festen Körpern mitzuteilen. Soll der Ton stark gehört werden, so muß den Gabeln die Resonanzröhre *i* genähert werden, welche auf den Ton der Gabel abgestimmt ist. Diese Resonanzröhre ist auf einem Brettchen *k* befestigt, welches in einem passenden Einschnitt des Brettes *dd* verschoben werden kann, um die Mündung der Röhre der Gabel möglichst zu nähern. In der Zeichnung ist die Röhre von der Gabel entfernt dargestellt worden, um die einzelnen Teile deutlicher zu zeigen; beim Gebrauch wird sie so dicht wie

möglich herangeschoben. Die Mündung der Resonanzröhre ist durch ein Deckelchen *l* geschlossen, welches an einem Hebel *m* sitzt. Zieht man an dem Faden *n*, so wird der Deckel vor der Öffnung fortgezogen, und der Ton der Gabel wird nun kräftig der Luft mitgeteilt. Läßt man den Faden *n* nach, so wird das Deckelchen durch die Feder *p* wieder vor die Öffnung der Röhre geschoben, und der Ton der Gabel wird nicht mehr vernommen. Indem man die Mündung der Röhre nur teilweise öffnet, kann man dem Ton der Gabel jede beliebige geringere Stärke geben. Sämtliche Fäden, welche die Resonanzröhren der verschiedenen Gabeln öffnen, sind übrigens zu einer kleinen Klaviatur geleitet und mit deren Tasten so verbunden, daß, wenn man eine Taste niederdrückt, die betreffende Resonanzröhre geöffnet wird.

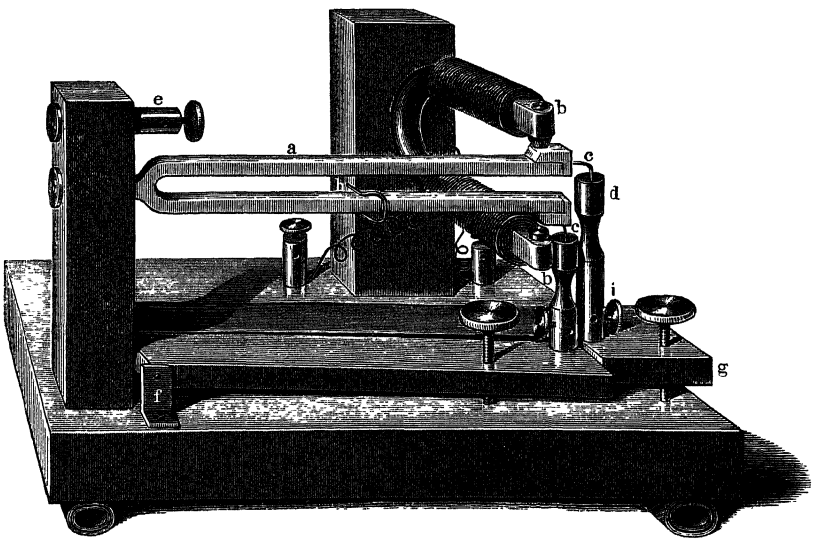
Ich habe zuerst acht solche Gabeln zur Verfügung gehabt, welche dem Ton *B* und den sieben ersten harmonischen Obertönen desselben (*b*, *f'*, *b'*, *d''*, *f''*, *as''* und *b''*) entsprachen. Jener Grundton entspricht etwa der Tonlage, in der Baßstimmen zu sprechen pflegen; später habe ich noch Gabeln für die Töne *d'''*, *f'''*, *as'''* und *b'''* machen lassen und den Ton *b* als Grundton des Klanges genommen.

Um die Gabeln in Bewegung zu setzen, werden intermittierende elektrische Ströme gebraucht, die man durch die Drahtwindungen der Elektromagnete leitet, und zwar muß die Zahl der elektrischen Stromstöße genau ebenso groß sein, wie die Zahl der Schwingungen der tiefsten Gabel *B*, nämlich 120 in der Sekunde. Jeder Stromstoß macht für einen Augenblick das Eisen des Elektromagneten *bb* magnetisch, so daß es die Zinken der Gabeln, welche selbst dauernd magnetisch gemacht sind, anzieht. Die Zinken der tiefsten Gabel *B* werden so bei jeder Schwingung einmal für kurze Zeit von den Polen des Elektromagneten angezogen, die Zinken der zweiten Gabel *b*, welche doppelt soviel Schwingungen macht, bei jeder zweiten Schwingung einmal usw., und dadurch werden die Schwingungen der Gabeln sowohl hervorgerufen, als auch dauernd unterhalten, solange man eben die elektrischen Ströme durch den Apparat gehen läßt. Die Schwingungen der tieferen Gabeln sind dabei sehr heftig, die der höheren verhältnismäßig schwach.

Um solche intermittierende Ströme von genau bestimmter Periodizität hervorzurufen, dient der in Fig. 33 abgebildete Apparat. Eine horizontal befestigte Stimmgabel *a* steht zwischen den Schenkeln eines Elektromagneten *bb*; ihre Enden tragen zwei Platindrähte *cc*, die in

zwei halb mit Quecksilber, halb mit Alkohol gefüllte Näpfchen *d* tauchen, welche die oberen Enden zweier messingenen Säulen bilden. Die Säulen haben Klemmschrauben *i*, die Drähte aufzunehmen, und stehen auf zwei Brettchen *fg*, die um eine Achse bei *f* drehbar sind und einzeln durch eine Stellschraube bei *g* etwas gehoben und gesenkt werden können. Man stellt sie genau so ein, daß die Spitzen der Platindrähte *cc* das Quecksilber in den Gefäßen *d* unter dem Alkohol gerade berühren. Eine dritte Klemmschraube *e* ist mit dem Griff der

Fig. 33.



Stimmgabel leitend verbunden. Wenn die Gabel schwingt und ein elektrischer Strom durch sie von *i* nach *e* geleitet wird, so wird dieser so oft unterbrochen, als sich das Ende der Gabel *a* aus dem Quecksilber des Näpfchens *d* hebt, und so oft wieder hergestellt, als der Platindraht wieder in das Quecksilber eintaucht. Wenn der so intermittierende Strom nun gleichzeitig durch den Elektromagneten *bb*, Fig. 33, geleitet wird, so erhält dieser, indem er so oft magnetisch wird, als der Strom durch ihn läuft, die selbst magnetische Gabel *a* in Schwingung. In der Regel wird nur eines der Näpfchen *d* zur Zuleitung des Stromes gebraucht. Alkohol wird über das Quecksilber gegossen, um zu vermeiden, daß das Quecksilber durch die bei der Unterbrechung des Stromes entstehenden elektrischen Funken ver-

brannt wird. Es ist diese Art der Stromunterbrechung von Neef erfunden worden; derselbe benutzte eine einfache schwingende Feder statt der Stimmgabel, eine Einrichtung, die sich an den zu medizinischen Zwecken viel gebrauchten Induktionsapparaten meistenteils vorfindet. Die Schwingungen einer Feder teilen sich aber allen benachbarten Körpern mit, sind deshalb für unsere Zwecke zu hörbar und außerdem zu unregelmäßig. Ich fand es deshalb nötig, statt der Feder eine Stimmgabel anzuwenden. Der Stiel einer recht symmetrisch gearbeiteten Stimmgabel wird durch die Schwingungen der Gabel außerordentlich wenig erschüttert und setzt deshalb auch die mit ihm verbundenen anderen Körper nicht in so kräftige Erschütterung, wie das befestigte Ende einer geraden Feder es tut. Die Stimmgabel des zuletzt beschriebenen Apparates muß im genauen Einklang mit der des Grundtones *B* sein; um diesen erhalten zu können, habe ich eine kleine Klemme *h* aus starkem Stahldraht benutzt, welche auf der einen Zinke sitzt. Schiebt man diese nach dem freien Ende der Zinke hin, so wird der Ton der Gabel tiefer, schiebt man sie gegen den Stiel der Gabel, so wird der Ton höher[1]).

Ist der ganze Apparat in Gang gebracht bei geschlossenen Resonanzröhren, so sind sämtliche Gabeln in gleichmäßig anhaltender Bewegung, während man von ihren Tönen nichts wahrnimmt, als höchstens ein leises Summen, welches durch die direkte Einwirkung der Gabeln auf die Luft veranlaßt wird. Wenn man aber eine oder einige der Resonanzröhren öffnet, so kommen deren Töne hinreichend kräftig zum Vorschein, und zwar desto stärker, je weiter man öffnet. So kann man schnell hintereinander verschiedene Zusammensetzungen des Grundtones mit einem oder mehreren harmonischen Obertönen in verschiedener Stärke hörbar machen und dadurch Klänge von verschiedener Klangfarbe hervorbringen.

Unter den natürlichen Klängen, welche zur Nachahmung durch die Stimmgabeln geeignet erscheinen, treten zunächst die Vokale der menschlichen Stimme hervor, weil sie verhältnismäßig wenig fremdartiges Geräusch enthalten und sehr entschiedene Unterschiede der Klangfarbe zeigen, welche leicht aufzufassen sind. Dabei sind die

[1]) Der Apparat ist von Fessel in Cöln gearbeitet; genauere Beschreibungen einzelner seiner Teile und Anweisungen für die damit auszuführenden Versuche sind in Beilage VIII gegeben.

meisten Vokale durch verhältnismäßig niedere Obertöne charakterisiert, die sich mit unseren Gabeln erreichen lassen, nur *E* und *I* gehen über diese Grenze etwas hinaus. Die Bewegung der ganz hohen Gabeln ist zu schwach unter dem Einfluß solcher elektrischer Ströme, als ich brauchen durfte, ohne anderweitige Störungen der Versuche durch den Lärm der elektrischen Funken zu veranlassen.

Die erste Reihe von Versuchen stellte ich mit den acht Gabeln von *B* bis *b''* an. *U*, *O*, *Ö* und auch noch *A* ließen sich nachbilden, das letztere aber doch nicht sehr scharf, weil die unmittelbar über seinem charakteristischen Ton *b''* gelegenen, und im natürlichen Klang des Vokals auch noch die merklich verstärkten Obertöne *c'''* und *d'''* fehlten. Der Grundton dieser Reihe *B* allein genommen gab ein sehr dumpfes *U*, viel dumpfer, als es die Sprache hervorbringen kann. Der Klang wurde dem *U* ähnlicher, wenn man den zweiten und dritten Partialton *b* und *f'* schwach mittönen ließ. Ein sehr schönes *O* ließ sich hervorbringen, wenn man *b'* stark angab, daneben schwächer *b*, *f'* und *d''*. Dabei mußte der Grundton *B* etwas gedämpft werden. Wenn ich dann plötzlich die Stellung der Klappen vor den Resonanzröhren änderte, so daß *B* ganz stark, die Obertöne alle aber schwach wurden, so sprach der Apparat sehr gut und deutlich hinter dem *O* ein *U*.

A oder vielmehr *Å* erhielt ich, indem ich namentlich die höchsten Töne der Reihe nach vom fünften zum achten möglichst hervortreten ließ, die unteren schwächte.

Die Vokale der zweiten und dritten Reihe, welche noch höhere charakteristische Töne haben, ließen sich nur sehr unvollständig nachbilden durch das Hervorheben ihrer tieferen Verstärkungstöne. Sie waren dann zwar nicht an sich selbst deutlich, aber wenigstens im Gegensatz zu *U* und *O*, wenn man sie mit diesen wechseln ließ. So gab es ein erträglich deutliches *Ä*, wenn ich hauptsächlich den vierten und fünften Ton stark hielt, die tieferen schwach, eine Art von *E*, wenn ich den dritten verstärkte, alle anderen schwach hielt. Der Unterschied vom *O* lag bei diesen beiden Vokalen hauptsächlich darin, daß der Grundton und seine Oktave beim *Ä* und *E* viel schwächer sein muß als beim *O*[1]).

[1]) Es sind nach diesen Angaben die in den Münchener gelehrten Anzeigen, 20. Juni 1859, gemachten zu verbessern. Ich kannte damals noch nicht die hohen Obertöne des *E* und *I*, und machte deshalb das *O* dumpfer, als es sein muß, um es von dem unvollkommenen *E* zu scheiden.

Um die Versuche auch auf die helleren Vokale ausdehnen zu können, habe ich mir später noch die Gabeln d''', f''', as''', b''' anfertigen lassen, deren beide oberste aber schon sehr schwach tönen, und habe als Grundton b statt des früheren tieferen Tones B gewählt. Mit diesen gelang es, $\ddot{A}$ und A recht gut herzustellen, und E wenigstens viel deutlicher als früher. Bis zu dem hohen charakteristischen Ton des I freilich konnte ich nicht hinaufreichen.

In dieser höheren Gabelreihe gibt nun der Grundton b allein genommen wieder U. Derselbe in mäßiger Stärke angegeben und stark mit seiner Oktave b', schwächer mit der Duodezime f'' begleitet, gibt O, dessen charakteristischer Ton eben b' ist. A erhält man, wenn man zu b zunächst b' und f'' mäßig stark, dagegen b'' und d''' als charakteristische Töne kräftig tönen läßt. Um A in $\ddot{A}$ überzuführen, muß man b' und f'', die Nachbarn des tieferen charakteristischen Tones d'', etwas verstärken, b'' dämpfen, dagegen d''' und f''' möglichst hervortreten lassen. Für E muß man die beiden tiefsten Töne der Reihe b und b'' mäßig stark halten, als Nachbarn des tieferen Verstärkungstones f', und die höchsten f''', as''', b''' möglichst heraustreten lassen. Es ist mir aber bisher nicht so gut wie mit den anderen Vokalen gelungen, weil die hohen Gabeln zu schwach waren und die zunächst oberhalb des charakteristischen Tones liegenden Obertöne, wie es scheint, nicht ganz fehlen dürfen.

Ähnlich wie die genannten Vokale der menschlichen Stimme lassen sich auch Töne von Orgelpfeifen verschiedener Register nachahmen, vorausgesetzt, daß sie nicht zu hohe Nebentöne geben; doch fehlt den nachgeahmten Tönen das scharfe sausende Geräusch, welches der an der Lippe der Pfeife gebrochene Luftstrom gibt. Die Stimmgabeln sind eben darauf beschränkt, den rein musikalischen Teil des Klanges nachzuahmen. Für die Nachahmung der Zungeninstrumente fehlen die scharfen hohen Obertöne, doch läßt sich das Näselnde der Klarinette durch eine Reihe ungerader Obertöne nachmachen, und die weicheren Klänge des Hornes durch den vollen Chor sämtlicher Gabeln.

Wenn aber nun auch nicht die Nachahmung sämtlicher Klänge möglich ist, so leistet der Apparat doch genug, um die wichtige Frage entscheiden zu können, ob eine Veränderung der Phasenunterschiede die Klangfarbe ändert. Diese Frage ist, wie ich schon im Anfang dieses Abschnittes hervorgehoben habe, für die Lehre von den Gehör-

empfindungen von fundamentaler Wichtigkeit. Ich muß aber die mit der Physik nicht vertrauten Leser um Entschuldigung bitten, wenn ihnen die Auseinandersetzung der zu ihrer Entscheidung angestellten Versuche vielleicht schwierig und trocken erscheint.

Die einfache Art, die Phasen der Nebentöne zu ändern, besteht darin, daß man die Resonanzröhren durch Verengerung ihrer Mündung etwas verstimmt; dadurch wird die Resonanz schwächer, und gleichzeitig ändert sich die Phase. Ist die Resonanzröhre so abgestimmt, daß der Ton, welcher die stärkste Resonanz in ihr erregt, mit dem Ton der zugehörigen Gabel genau zusammenfällt, so fällt der mathematischen Theorie gemäß [1]) die größte nach außen gerichtete Geschwindigkeit der Luft in der Mündung der Röhre zusammen mit der größten nach innen gerichteten Geschwindigkeit der Gabelenden. Wird die Röhre dagegen etwas tiefer gestimmt, so tritt die größte Geschwindigkeit der Luft etwas früher ein, und wird die Röhre höher gemacht, so tritt sie später ein als die größte Geschwindigkeit der Gabel. Je mehr man die Stimmung ändert, desto beträchtlicher wird der Phasenunterschied, zuletzt wird er gleich einer Viertelschwingungsdauer. Die Größe des Phasenunterschiedes hängt dabei genau zusammen mit der Stärke der Resonanz, so daß man nach der Stärke der Resonanz auch einigermaßen die Größe des Phasenunterschiedes schätzen kann. Wenn wir die Stärke des Schalles in der Röhre bei vollkommenem Einklang der Röhre und der Gabel gleich 10 setzen, und die Dauer einer ganzen Schwingung wie die Peripherie eines Kreises in 360° eingeteilt denken, so wird die Stärke der Resonanz in folgender Weise von dem Phasenunterschied abhängen:

Stärke der Resonanz	Phasenunterschied in Winkelgraden	Stärke der Resonanz	Phasenunterschied in Winkelgraden
10	0° 0′	5	75° 31′
9	35 54	4	80 48
8	50 12	3	84 50
7	60 40	2	87 42
6	68 54	1	89 26

Daraus geht hervor, daß eine verhältnismäßig kleine Schwächung der Resonanz durch Veränderung der Stimmung beträchtliche Phasen-

[1]) Siehe Beilage IX.

unterschiede hervorbringt, während bei größerer Schwächung die Phasen sich nur noch wenig verändern. Dieser Umstand läßt sich benutzen, um bei der Zusammensetzung der Vokalklänge mittels der Stimmgabeln alle möglichen Veränderungen der Phasen hervorzubringen; man braucht nur den Deckel vor die Resonanzröhre so weit vortreten zu lassen, daß die Stärke des Tones merklich geschwächt wird. Wenn man das Verhältnis, in welchem diese Stärke abgenommen hat, ungefähr zu beurteilen weiß, findet man aus der oben gegebenen Tafel den Phasenunterschied. Auf diese Weise kann man die Schwingungen des betreffenden Tones um jede Größe bis zu einer Viertelschwingungsdauer verändern. Änderung der Phasen um eine halbe Schwingungsdauer erreicht man dadurch, daß man den elektrischen Strom in dem Elektromagneten der betreffenden Gabel in entgegengesetzter Richtung gehen läßt. Die Enden der Gabel werden dann von dem Elektromagneten abgestoßen, während der Strom durchgeht, anstatt angezogen zu werden, und die Bewegung der Gabel wird gerade die entgegengesetzte als vorher. Man darf aber eine solche Erregung der Gabel durch abstoßende Ströme nicht zu lange fortsetzen, weil sonst allmählich der Magnetismus der Gabel geschwächt wird, während die anziehenden Ströme ihn verstärken oder auf seinem Maximum erhalten. Es ist bekannt, daß der Magnetismus von Eisenmassen, welche in starke Erschütterung versetzt sind, sich leicht verändert.

Hat man auf diese Weise einen Klang zusammengesetzt, in welchem durch halbe Öffnung einiger Resonanzröhren die entsprechenden Töne geschwächt und ihrer Phase nach geändert sind, so kann man denselben Klang zusammensetzen mit derselben Schwächung der betreffenden Teiltöne, aber ohne Phasenänderung, wenn man die Resonanzröhren ganz öffnet, aber von den schwingenden Gabeln etwas zurückzieht, bis ihr Ton so weit als nötig abgeschwächt ist.

Läßt man z. B. nebeneinander die Gabel *B* und *b* tönen, zuerst bei vollständig geöffneten Resonanzröhren und vollem Einklang, so werden sie ihre Schwingungen so ausführen, daß in den Luftwellen der Fig. 31 *A* und *B*, S. 195, die Punkte *e* und d_0 zusammenfallen, und in entfernteren Teilen des Zimmers die zusammengesetzte Schwingungskurve *C* den Luftschwingungen entspricht. Nun kann man den Punkt *e* der Kurve *B* auch mit Punkten zwischen d_0 und d_2 der

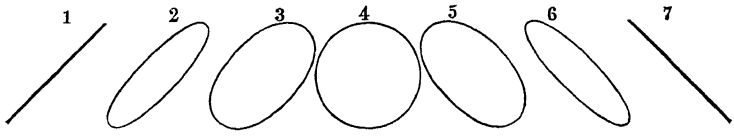
Kurve A zusammenfallen lassen, indem man die Resonanzröhre der Gabel B mehr und mehr schließt. Soll e auf d_1 fallen, so muß die Tonstärke von B etwa $^3/_4$ von der Tonstärke desselben Tones bei offener Röhre werden. Andererseits kann man den Punkt e mit d_4 zusammenfallen lassen, indem man den elektrischen Strom in einem der Elektromagneten umkehrt und die Resonanzröhren vollständig öffnet. Endlich kann man wieder durch unvollständige Öffnung der Röhre B den Punkt e gegen δ hin wandern lassen. Andererseits kann man auch e, wenn es entweder mit d_0 (oder, was dem gleich ist, mit δ) oder mit d_4 zusammenfällt, durch unvollständige Öffnung der Röhre b rückwärts von δ gegen d_4 oder von d_4 bis d_3 wandern lassen. Die Verhältnisse der Tonstärken lassen sich in allen diesen Fällen ohne Veränderung der Phasen dadurch ausgleichen, daß man die eine oder andere Röhre von ihrer Gabel entfernt, ohne die Weite der Öffnung zu verändern.

In der beschriebenen Weise lassen sich also alle möglichen Phasenunterschiede zwischen je zwei Röhren hervorbringen. Dasselbe Verfahren kann natürlich auch für jede beliebige Zahl von Röhren angewendet werden. Ich habe in dieser Weise mannigfache Kombinationen der Töne mit verschiedenen Phasenunterschieden versucht, aber niemals gefunden, daß sich die Klangfarbe im geringsten dabei veränderte. Es war für den Klang immer vollständig gleichgültig, ob ich einzelne Partialtöne durch unvollständige Öffnung der Röhren, oder durch deren Entfernung von den Stimmgabeln abschwächte, wodurch also die von uns aufgestellte Frage dahin entschieden wird, daß die Klangfarbe des musikalischen Teiles eines Klanges nur abhängt von der Zahl und Stärke der Teiltöne, nicht von ihren Phasenunterschieden.

Die bisherige Beweisführung für die Unabhängigkeit der Klangfarbe von den Phasenunterschieden ist experimentell am leichtesten auszuführen, aber ihre Beweiskraft beruht nur auf der theoretischen Einsicht, daß die Phasen gleichzeitig mit der Stärke des Tones verändert werden, und diese Einsicht kann nur durch die mathematische Theorie gegeben werden. Wir können die Luftschwingungen nicht unmittelbar sichtbar machen. Mit einer kleinen Abänderung läßt sich der Versuch indessen auch so ausführen, daß wir die veränderten Phasen unmittelbar sichtbar machen, wenn wir nämlich die

Stimmgabeln, aber nicht die Resonanzröhren verstimmen; dies läßt sich durch aufgesetzte Wachsklümpchen leicht bewirken. Für die Phasen einer Stimmgabel, welche unter dem Einfluß elektrischer Ströme schwingt, gilt nämlich dasselbe Gesetz, wie für die Resonanzröhren. Die Phase verändert sich allmählich um eine Viertelschwingungsdauer, wenn durch Verstimmung der Gabel deren Tonstärke allmählich vom Maximum auf Null gebracht wird. Die Phase der Luftbewegung behält immer dieselbe Beziehung zu der Phase der Stimmgabelschwingung, da die Tonhöhe, welche durch die Zahl der elektrischen Stromstöße bestimmt wird, bei der Veränderung der Gabel nicht mit verändert wird. Diese Veränderung der Phase der Gabel kann direkt beobachtet werden mittels des Vibrationsmikroskopes von Lissajous, welches schon oben beschrieben und in Fig. 22 auf S. 138 abgebildet worden ist. Man stellt die Zinken der Gabel und das Mikroskop dieses Instrumentes horizontal auf, die zu untersuchende Gabel vertikal, pulvert auf das obere Ende von einer ihrer Zinken etwas Stärkemehl, stellt das Mikroskop auf eines der Stärkemehlkörnchen ein, und erregt beide Gabeln durch die elektrischen Ströme der Unterbrechungsgabel, Fig. 33. Die Gabel des Instrumentes von Lissajous ist im Einklang mit der Unterbrechungsgabel. Das Amylumkörnchen schwingt selbst in einer horizontalen Linie, das Objektivglas des Mikroskopes vertikal, und so entstehen durch die Zusammensetzung beider Bewegungen Kurven, wie bei den früher beschriebenen Beobachtungen an den Saiten der Violine.

Fig. 34.



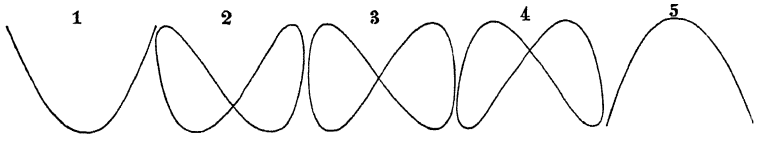
Ist die beobachtete Gabel ebenfalls im Einklang mit der Unterbrechungsgabel, so ist die Kurve eine schräge gerade Linie, Fig. 34 (1), wenn beide Gabeln gleichzeitig durch ihre Gleichgewichtslage gehen; die gerade Linie geht durch eine lang gestreckte schräg liegende Ellipse (2, 3) in einen Kreis oder eine senkrechte Ellipse (4) über, wenn der Phasenunterschied bis zu einer Viertelschwingungsdauer steigt; dann durch eine anders gerichtete Ellipse (5, 6) in eine ebensolche

gerade Linie (7), wenn der Unterschied bis auf eine halbe Schwingungsdauer vergrößert wird.

Ist die zweite Gabel die höhere Oktave der Unterbrechungsgabel, so stellen die Kurven Fig. 35 1, 2, 3, 4, 5 die Reihe der Formen dar, wobei 3 dem Falle entspricht, wo beide Gabeln gleichzeitig durch die Gleichgewichtslage gehen; 2 und 4 sind um $^1/_{12}$, 1 und 5 um $^1/_4$ Undulation der höheren Gabel davon unterschieden.

Wenn man zunächst die Gabeln mit der Unterbrechungsgabel in möglichst genauen Einklang bringt, so daß beide ihre stärkste Vibration geben, und dann durch aufgelegtes oder abgenommenes Wachs

Fig. 35.



ihre Stimmung ein wenig verändert, so sieht man auch gleichzeitig in dem mikroskopischen Bilde die eine Figur in die andere übergehen, und man kann sich so sehr leicht von der Richtigkeit des angeführten Gesetzes überzeugen. Die Versuche über die Klangfarbe werden nachher so ausgeführt, daß man zuerst alle Gabeln möglichst genau auf die harmonischen Obertöne der Unterbrechungsgabel abstimmt, und durch Entfernung der Resonanzröhren von den Gabeln die gewünschten Verhältnisse der Stärke hervorbringt, dann die Gabel durch aufgelegte Wachsklümpchen beliebig verstimmt. Die Größe der Wachsklümpchen kann man vorher bei den mikroskopischen Beobachtungen so regulieren, daß sie einen Phasenunterschied von verlangter Größe hervorbringen. Dadurch werden die Schwingungen der Gabeln gleichzeitig aber auch schwächer, und man muß deshalb die Stärke der Töne durch Näherung oder Entfernung der Resonanzröhren wieder den früheren gleichmachen.

Das Resultat ist bei diesen Versuchen, wo die Gabeln verstimmt werden, wieder dasselbe, wie bei der Verstimmung der Resonanzröhren; es ist keine Veränderung der Klangfarbe wahrzunehmen, wenigstens keine solche, welche deutlich genug wäre, daß man sie nach der kleinen Zeit von einigen Sekunden, die man zur Umänderung des Apparates gebraucht, noch erkennen könnte, jedenfalls also

keine solche Veränderung der Klangfarbe, wodurch ein Vokal in einen anderen verwandelt würde.

Eine scheinbare Ausnahme von dieser Regel muß hier erwähnt werden. Wenn man die Gabeln *B* und *b* nicht ganz rein stimmt, und durch Streichen oder Anschlagen in Schwingung bringt, so hört ein aufmerksames Ohr ganz schwache Schwebungen, die als kleine Veränderungen der Tonstärke und der Klangfarbe erscheinen. Diese Schwebungen hängen allerdings damit zusammen, daß die schwingenden Gabeln nacheinander in verschiedene Phasenunterschiede gelangen. Ihre Erklärung wird bei den Kombinationstönen gegeben werden, und es wird sich dort zeigen, daß auch diese kleinen Veränderungen der Klangfarbe auf Veränderungen der Tonstärke eines der Töne zurückgeführt werden können.

Wir können demnach das wichtige Gesetz aufstellen, daß die Unterschiede der musikalischen Klangfarbe nur abhängen von der Anwesenheit und Stärke der Partialtöne, nicht von ihren Phasenunterschieden. Es ist hier wohl zu bemerken, daß nur von der musikalischen Klangfarbe, wie wir diese oben definiert haben, die Rede ist. Wenn unmusikalische Geräusche mit dem Klang verbunden sind, Knarren, Kratzen, Sausen, Zischen, so können wir diese entweder gar nicht als regelmäßig periodische Bewegungen betrachten, oder sie entsprechen hohen, dicht nebeneinander liegenden und miteinander scharf dissonierenden Obertönen. Auf letztere konnten wir unsere Versuche nicht ausdehnen und wir werden es deshalb vorläufig zweifelhaft lassen müssen, ob bei dergleichen dissonierenden Tönen Phasenunterschiede in Betracht kommen. Spätere theoretische Betrachtungen werden es wahrscheinlich machen, daß dies wirklich der Fall ist.

Wenn es nur darauf ankommt, durch zusammengesetzte Klänge die Vokale nachzuahmen, ohne daß man die Phasenunterschiede der einzelnen Teiltöne kontrollieren will, so kann man dies auch ziemlich gut mit Orgelpfeifen erreichen. Nur muß man mindestens zwei Reihen derselben haben, stark tönende offene und schwach tönende gedackte Pfeifen, weil man die Stärke des Tones nicht durch veränderte Stärke des Windes ändern kann, ohne gleichzeitig auch die Tonhöhe zu ändern. Ich habe von Herrn Appun in Hanau eine solche doppelte Pfeifenreihe erhalten, welche die ersten sechzehn

Teiltöne des *B* gibt. Alle diese Pfeifen stehen auf einer gemeinsamen Windlade, welche auch die Schieber enthält, mit denen man die einzelnen Pfeifen öffnen und schließen kann. Zwei größere Schieber schließen die Windlade gegen den Blasebalg ab. Während man die letzteren geschlossen läßt, stellt man die Schieber der einzelnen Pfeifen so, wie sie die verlangte Kombination der Töne gibt, und öffnet dann erst einen der Hauptschieber der Windlade, so daß alle Pfeifen auf einmal angeblasen werden. Kurze Tonstöße, auf diese Weise hervorgebracht, zeigen den Vokalcharakter viel besser als ein lange anhaltender Klang. Man tut am besten, den Grundton und die hervortretenden Obertöne der gewünschten Vokale gleichzeitig durch die offenen und gedackten Pfeifen anzugeben, und für die nächst benachbarten Töne nur die schwachen gedackten Pfeifen zu öffnen, so daß der starke Ton nicht zu isoliert dasteht.

Die Nachahmung der Vokale mit einem solchen Apparat ist keine sehr vollkommene, schon deshalb nicht, weil man die Tonstärke der verschiedenen Pfeifen nicht so fein abändern kann, wie die der Stimmgabeln, und namentlich sind die hohen Töne zu schreiend. Indessen kann man immerhin erkennbare Vokalklänge auf diese Weise zusammensetzen.

Wir gehen jetzt dazu über, die Rolle, welche das Ohr bei der Wahrnehmung der Klangfarbe spielt, näher zu besprechen. Die ältere Voraussetzung über die Leistungen des Ohres ist, daß das Ohr sowohl die Fähigkeit habe, die Zahl der Schwingungen eines Klanges zu unterscheiden und danach die Höhe des Tones zu bestimmen, als auch die Form der Schwingungen zu unterscheiden, von welcher die Verschiedenheit der Klangfarbe abhänge. Die letztere Behauptung gründete sich nur auf Schlüsse, welche auf die Exklusion der anderen möglichen Annahmen gegründet waren. Da nachgewiesen werden konnte, daß gleiche Höhe zweier Töne durchaus gleiche Zahl der Schwingungen erfordere, da ferner die Stärke des Tones sichtlich von der Stärke der Schwingungen abhing, so mußte die Klangfarbe von etwas anderem als von der Zahl und Stärke der Schwingungen abhängen. Es blieb nur die Form der Schwingungen. Wir können nun diese Ansicht noch genauer bestimmen. Die zuletzt beschriebenen Versuche ergaben, daß Wellen von sehr verschiedener Form (z. B. S. 195, Fig. 31 *CD*, und S. 53, Fig. 12 *C* und *D*)

gleiche Klangfarbe haben können, und zwar existieren in jedem Falle (den einfachen Ton ausgenommen) unendlich viele verschiedene Wellenformen dieser Art, da jede Änderung des Phasenunterschiedes die Form verändert, ohne den Klang zu ändern. Entscheidend ist nur, ob die Luftschwingungen, welche das Ohr treffen, wenn sie in eine Summe einfacher pendelartiger Schwingungen zerlegt gedacht werden, die gleichen einfachen Schwingungen in gleicher Stärke geben.

Das Ohr unterscheidet also nicht die verschiedene Form der Wellen an sich genommen, wie das Auge Bilder der verschiedenen Schwingungsformen unterscheiden kann; das Ohr zerlegt vielmehr die Wellenformen nach einem bestimmten Gesetz in einfachere Bestandteile; es empfindet diese einfachen Bestandteile einzeln als harmonische Töne; es kann sie bei gehörig geschulter Aufmerksamkeit einzeln zum Bewußtsein bringen, und es unterscheidet als verschiedene Klangfarben nur verschiedene Zusammensetzungen aus diesen einfachen Empfindungen.

Lehrreich ist in dieser Beziehung die Vergleichung zwischen Auge und Ohr. Wenn dem Auge die schwingende Bewegung sichtbar gemacht wird, z. B. durch das Vibrationsmikroskop, so ist es imstande, alle verschiedenen Formen von Schwingungen voneinander zu unterscheiden, auch solche, welche das Ohr nicht unterscheiden kann. Aber das Auge ist nicht imstande, unmittelbar die Zerlegung der Schwingungen in einfache Schwingungen auszuführen, wie es das Ohr tut. Das Auge, mit dem genannten Instrument bewaffnet, unterscheidet also wirklich die Form der Schwingung als solche, und unterscheidet alle verschiedenen Formen der Schwingung; das Ohr dagegen unterscheidet nicht alle verschiedenen Schwingungsformen, sondern nur solche, welche, in pendelartige Schwingungen zerlegt, verschiedene Bestandteile ergeben; aber indem es eben diese Bestandteile einzeln unterscheidet und empfindet, ist es dem Auge, welches dies nicht kann, wieder überlegen.

Es ist diese Zerlegung der Schwingungen in einfache pendelartige eine sehr auffallende Eigenschaft des Ohres. Der Leser muß sich wohl daran erinnern, daß, wenn wir die Schwingungen, welche ein einzelnes musikalisches Instrument hervorbringt, zusammengesetzte genannt haben, die Zusammensetzung zunächst eben nur für unsere Wahrnehmung durch das Ohr existiert, oder für die mathe-

matische Theorie, während in Wirklichkeit die Bewegung der Luftteilchen keine zusammengesetzte, sondern eine einfache ist, verursacht durch eine einzige Ursache. Wenn wir uns nun in der Natur nach Analogien für eine solche Zerlegung periodischer Bewegungen in einfache umsehen, so finden wir keine andere Analogie als die Erscheinungen des Mitschwingens. In der Tat, denken wir uns den Dämpfer eines Klaviers gehoben, und lassen irgend einen Klang kräftig gegen den Resonanzboden wirken, so bringen wir eine Reihe von Saiten in Mitschwingung, nämlich alle die Saiten und nur die Saiten, welche den einfachen Tönen entsprechen, die in dem angegebenen Klang enthalten sind. Hier tritt also auf rein mechanischem Wege eine ähnliche Trennung der Luftwellen ein wie durch das Ohr, indem die an sich einfache Luftwelle eine gewisse Anzahl von Saiten in Mitschwingung bringt, und indem das Mitschwingen dieser Saiten von demselben Gesetz abhängt, wie die Empfindung der harmonischen Obertöne im Ohr.

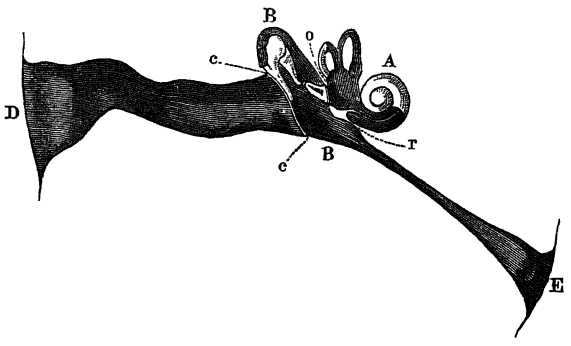
Ein gewisser Unterschied zwischen beiden Apparaten beruht nur darin, daß die Klaviersaiten auch ziemlich leicht in ihren Obertönen mitschwingen, wobei sie in mehrere schwingende Abteilungen zerfallen. Wir wollen von diesem Umstand bei unserem Vergleich absehen. Übrigens wäre es möglich, ein Instrument herzustellen, dessen Saiten nur auf ihren Grundton merklich und stark mitschwingen, wenn man nämlich die Saiten in ihrer Mitte mit Gewichtchen belasten wollte, wodurch die höheren Töne der Saiten unharmonisch zu ihrem Grundton werden würden.

Könnten wir nun jede Saite eines Klaviers mit einer Nervenfaser so verbinden, daß die Nervenfaser erregt würde und empfände, so oft die Saite in Bewegung geriete: so würde in der Tat genau so, wie es im Ohr wirklich der Fall ist, jeder Klang, der das Instrument trifft, eine Reihe von Empfindungen erregen, genau entsprechend den pendelartigen Schwingungen, in welche die ursprüngliche Luftbewegung zu zerlegen wäre; und somit würde die Existenz jedes einzelnen Obertones genau ebenso wahrgenommen werden, wie es vom Ohr wirklich geschieht. Die Empfindungen verschieden hoher Töne würden unter diesen Umständen verschiedenen Nervenfasern zufallen, und daher ganz getrennt und unabhängig voneinander zustande kommen.

Nun lassen in der Tat die neueren Entdeckungen der Mikroskopiker über den inneren Bau des Ohres die Annahme zu, daß im Ohr ähnliche Einrichtungen vorhanden seien, wie wir sie uns eben erdacht haben. Es findet sich nämlich das Ende jeder Nervenfaser des Gehörnerven verbunden mit kleinen elastischen Teilen, von denen wir annehmen müssen, daß sie durch die Schallwellen in Mitschwingung versetzt werden.

Der Bau des Ohres läßt sich kurz in folgender Weise beschreiben. Die zarten Enden der Nervenfasern des Gehörnerven befinden sich ausgebreitet auf feinen Membranen in einer mit Wasser gefüllten Höhle, welche wegen ihrer verwickelten Form das Labyrinth des Ohres genannt wird. Um die Schwingungen der Luft hinreichend kräftig auf das Wasser des Labyrinthes zu übertragen, dazu dient ein zweiter Teil des Ohres, nämlich die Paukenhöhle mit den darin liegenden Teilen. Fig. 36 zeigt in natürlicher Größe einen schematischen Durchschnitt der zum Gehörorgan gehörigen Höhlen. *A* ist das Labyrinth, *BB* die Paukenhöhle, *D* der trichterförmige Eingang in den äußeren Gehörgang, der in seiner Mitte am engsten ist, gegen das innere Ende hin sich wieder etwas erweitert. Das innere Ende des aus einer teils knorpeligen, teils knöchernen Röhre gebildeten äußeren Gehörganges ist von der Paukenhöhle *B* getrennt durch eine kreisrunde dünne Membran, das Trommelfell (Paukenfell) *cc*, welche in einem knöchernen Ring ziemlich schlaff ausgespannt ist. Die Paukenhöhle *B* liegt zwischen dem äußeren Gehörgang und dem Labyrinth. Von dem letzteren ist sie durch knöcherne Wände getrennt, in denen nur zwei durch Membranen verschlossene Öffnungen bleiben, die beiden sogenannten Fenster des Labyrinthes, von denen das obere oder ovale Fenster, *o*, Fig. 36, mit dem einen Gehörknöchelchen, dem Steigbügel, verbunden

Fig. 36.



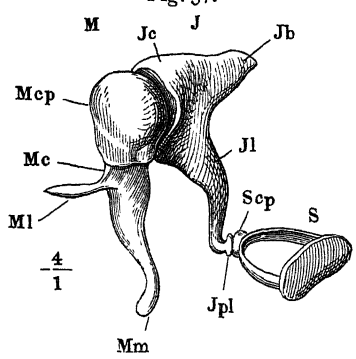
ist. Das untere oder runde Fenster *r* ist ohne Verbindung mit den Knöchelchen.

Vom äußeren Gehörgang und dem Labyrinth ist also die Paukenhöhle überall abgeschlossen; dagegen hat sie einen freien Eingang vom oberen Teil der Schlundhöhle aus, die sogenannte Eustachische Trompete oder Tuba *E*, so genannt, weil ihre gegen den Schlund gekehrte Öffnung wie das Ende einer Trompete erweitert ist, während die Mitte der Röhre sehr eng ist. Das in die Paukenhöhle übergehende Ende der Tuba ist aus Knochen gebildet, das gegen den Schlund gekehrte erweiterte Ende dagegen aus einer dünnen biegsamen Knorpelplatte, welche längs der oberen Seite gespalten ist. Die Ränder der Spalte sind durch eine sehnige Membran geschlossen. Man kann durch die Tuba Luft in die Trommelhöhle eintreiben oder herausziehen, wenn man Nase und Mund verschließt und die Luft im Munde entweder zusammenpreßt oder durch Saugen verdünnt. Sowie die Luft in die Trommelhöhle eintritt oder austritt, fühlt man ein plötzliches Rucken im Ohr und hört ein Knacken. Dabei wird man bemerken, daß die Luft nur in solchen Augenblicken vom Schlund in das Ohr oder vom Ohr in den Schlund tritt, wo man eine Schlingbewegung macht. Ist die Luft in das Ohr eingedrungen, so bleibt sie darin, auch wenn man nun Mund und Nase wieder öffnet, bis man eine Schlingbewegung macht. Bei letzterer tritt sie aus, was sich dadurch zu erkennen gibt, daß ein neues Knacken eintritt, und das Gefühl der Spannung im Trommelfell, was so lange bestand, nun aufhört. Es folgt aus diesen Versuchen, daß die Tuba für gewöhnlich gar nicht offen ist, sondern nur beim Schlingen geöffnet wird, was sich dadurch erklärt, daß die Muskeln, die das Gaumensegel heben und beim Schlingen in Tätigkeit gesetzt werden, zum Teil von dem knorpeligen Ende der Tuba entspringen. Für gewöhnlich ist also die Paukenhöhle ganz geschlossen, mit Luft gefüllt, und der Druck dieser Luft bleibt dem der atmosphärischen Luft gleich, da er von Zeit zu Zeit während der Schlingbewegungen Gelegenheit hat, sich mit diesem auszugleichen. Gegen stärkeren Luftdruck öffnet sich die Tuba auch ohne Schlingbewegung, und bei verschiedenen Individuen scheint ihr Widerstand sehr verschieden groß zu sein.

Die Luft der Paukenhöhle ist an zwei Stellen vom Wasser des Labyrinthes ebenfalls nur durch dünne gespannte Membranen ge-

trennt. Diese Membranen schließen die schon erwähnten Öffnungen, nämlich das ovale (*o*, Fig. 36) und das runde Fenster (*r*) des Labyrinthes. Beide Membranen sind auf ihrer äußeren Seite mit der Luft der Trommelhöhle, auf der inneren mit dem Wasser des Labyrinthes in Berührung; die des runden Fensters ist ganz frei, die des ovalen Fensters dagegen mittels einer Reihe von drei durch Gelenke verbundenen Knöchelchen, Gehörknöchelchen, mit dem Trommelfell verbunden. Fig. 37 zeigt die drei Knöchelchen in ihrer natürlichen Verbindung miteinander und in viermaliger Vergrößerung der Lineardimensionen; sie sind der Hammer *M* (Malleus), der Amboß *I* (Incus) und der Steigbügel *S* (Stapes). Ersterer ist mit dem Trommelfell, letzterer mit der Membran des ovalen Fensters verbunden.

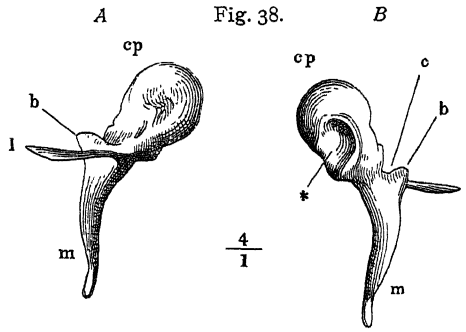
Fig. 37.



Gehorknöchelchen in gegenseitiger Verbindung, von vorn und von einer rechten Kopfhalfte, welche um die vertikale Achse etwas nach rechts gedreht ist. *M* Hammer. *I* Amboß. *S* Steigbügel. *Mcp* Kopf. *Mc* Hals. *Ml* langer Fortsatz. *Mm* Handgriff des Hammers. *Ic* Körper. *Ib* kurzer, *Il* langer Fortsatz. *Ipl* Proc. lenticularis des Ambosses. *Scp* Capitulum des Steigbügels.

Der Hammer, einzeln dargestellt in Fig. 38, zeigt ein oberes dickeres abgerundetes Ende, den Kopf *cp*, und ein unteres dünneres, den Stiel oder Handgriff *m*; zwischen beiden ist eine Einschnürung *c*, der Hals des Hammers. An der nach hinten gekehrten Seite des Kopfes findet man eine Gelenkfläche*, mittels deren er sich an den Amboß anlegt. Unterhalb des Halses, wo dieser in den Stiel übergeht, ragen zwei Fortsätze hervor, der lange *l* oder Processus Folianus, und der kurze Fortsatz *b*. Ersterer ist nur bei Kindern so lang, wie ihn die Abbildungen zeigen; bei Erwachsenen scheint er meist bis auf einen kleinen Stumpf resorbiert zu sein. Er hat

Fig. 38.

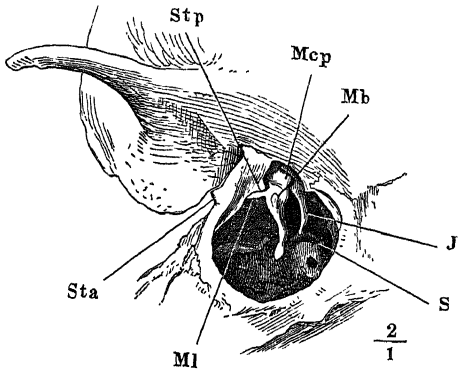


Rechter Hammer, *A* von vorn, *B* von hinten. *cp* Kopf. *c* Hals. *b* kurzer, *l* langer Fortsatz. *m* Handgriff. * Gelenkfläche.

die Richtung nach vorn und liegt in den Bandmassen verdeckt, die nach vorn hin den Hammer festheften. Der kurze Fortsatz *b* dagegen ist gegen das Trommelfell gekehrt, dessen obersten Teil er etwas hervordrängt. Von der Spitze dieses Fortsatzes *b* bis zur Spitze des Stieles *m* ist der Hammer im oberen Teil des Trommelfelles festgeheftet, und zwar so, daß die Spitze des Stieles das Trommelfell stark nach innen zieht.

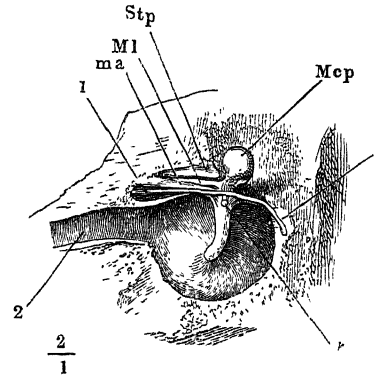
Fig. 39 und 40 zeigen den Hammer in seiner natürlichen Lage, erstere von außen nach Wegnahme des Trommelfelles, letztere von

Fig. 39.



Linkes Schläfenbein des Neugeborenen mit den Gehörknöchelchen, in situ. *Sta* Spina tympanica ant. *Stp* Spina tympan. post. *Mcp* Kopf des Hammers. *Mb* kurzer, *Ml* langer Fortsatz des Hammers. *I* Amboß. *S* Steigbügel.

Fig. 40.



Rechtes Paukenfell mit dem Hammer, von innen. Das innere Blatt der Hammerfalte der Schleimhaut (s. u.) ist weggenommen. *Stp* Spina tympanica post. *Mcp* Kopf des Hammers. *Ml* langer Fortsatz desselben. *ma* Lig. mallei ant. 1 Chorda tympani, 2 Tuba. * Sehne des M. tensor tympani dicht an der Insertion durchschnitten.

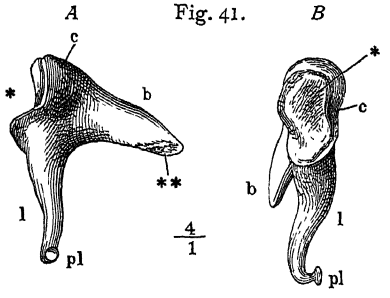
innen. Der Hammer ist längs des oberen Randes des Trommelfelles angeheftet durch eine Schleimhautfalte, in deren Inneren eine Reihe ziemlich straffer Sehnenfaserbündel verlaufen. Am Hammer entspringen diese Anheftungsbänder in einer Linie, die vom Processus Folianus (Fig. 38 *l*) aus sich oberhalb der verengten Stelle des Halses gegen das untere Ende der Gelenkfläche für den Amboß hinzieht, und bei älteren Leuten zu einer stark hervorragenden Knochenleiste entwickelt ist. Am stärksten und straffsten sind diese Bandmassen am vorderen und hinteren Ende dieser Ansatzlinie. Die vordere Bandmasse, Ligamentum Mallei anterius (*m a*, Fig. 40), umhüllt den Processus Folianus und heftet sich teils an eine Knochenspitze

(*Stp*, Fig. 39 und 40) des knöchernen Paukenringes, welche bis dicht an den Hals des Hammers vorragt, teils an deren unteren Rand, teils senkt sie sich in eine von hier gegen das Kiefergelenk hinziehende Knochenspalte ein. Der hintere Teil der beschriebenen Bandmasse dagegen heftet sich an eine nach innen vom Trommelfell und diesem parallel hervoragende scharfkantige Knochenleiste etwas oberhalb der Öffnung, in welche ein hier durchziehender Nerv, die Chorda Tympani (1, 1, Fig. 40), in den Knochen eintritt. Diese letzteren Faserzüge können wir als Ligamentum Mallei posterius bezeichnen. In Fig. 39 erscheint der Ansatzpunkt dieses Bandes als ein kleiner Vorsprung des Ansatzringes des Trommelfelles, welcher nach rechts hin den links bei *Stp* beginnenden oberen Ausschnitt der Öffnung für das Trommelfell begrenzt, gerade an der Stelle, wo in der Figur der lange Fortsatz *I* des Ambosses zum Vorschein kommt. Das Ligamentum anterius und posterius zusammengenommen bilden einen mäßig gespannten Sehnenstrang, um den sich der Hammer wie um eine Achse drehen kann. Auch wenn man die beiden anderen Gehörknöchelchen vorsichtig entfernt hat, ohne die beschriebenen Bänder des Hammers zu lösen, bleibt er deshalb in seiner natürlichen Stellung stehen, wenn auch weniger stramm als vorher.

Die mittleren Fasern des genannten breiten Befestigungsbandes des Hammers gehen gerade nach außen gegen den oberen knöchernen Rand des Trommelfelles. Sie sind verhältnismäßig kurz und wohl als Ligamentum Mallei externum bezeichnet worden. Da sie oberhalb der Achsenlinie am Hammer entspringen, hemmen sie eine zu starke Einwärtsdrehung des Kopfes und Auswärtsdrehung des Stieles mit dem Trommelfell, und widersetzen sich einer Zerrung des Achsenbandes nach unten hin. Erstere Wirkung wird noch verstärkt durch ein Band (Ligamentum Mallei superius), welches sich vom Processus Folianus aus nach oben in die schmale Spalte hineinzieht, die, wie Fig. 40 erkennen läßt, zwischen dem Kopf des Hammers und der Wand der Paukenhöhle bleibt.

Zu bemerken ist noch, daß im oberen Teil des Kanales der Tuba ein Muskel liegt, der Spannmuskel des Trommelfelles, dessen Sehne, quer durch die Trommelhöhle hindurchgehend, sich innen an den oberen Teil des Hammerstieles ansetzt (*Fig. 40). Dieser Muskel ist als ein mäßig gespanntes elastisches Band zu be-

trachten, dessen Spannung zeitweilig durch aktive Zusammenziehung beträchtlich erhöht werden kann. Auch dieser Muskel wirkt darauf hin, hauptsächlich den Stiel des Hammers mit dem Trommelfell nach innen zu ziehen. Da aber sein Ansatz so nahe unter dem Achsenband liegt, so wirkt der Hauptteil seines Zuges auf dieses ein und spannt es, indem er es etwas nach innen zieht. Dabei ist zu bemerken, daß an einem geradlinigen mäßig gespannten unausdehnsamen Strang, wie es das Achsenband des Hammers ist, schon eine geringe Kraft, welche ihn seitwärts zu ziehen strebt, eine sehr erhebliche Steigerung der Spannung hervorbringen kann. Das ist bei der genannten Anordung des Spannmuskels der Fall. Es ist dabei zu bemerken, daß auch die ruhenden, nicht innervierten Muskeln des lebenden Körpers immer elastisch gespannt sind und wie elastische Bänder wirken. Diese Spannung kann allerdings durch Innervation, die den Muskel in Tätigkeit setzt, erheblich gesteigert werden, aber sie fehlt bei den meisten Muskeln des Körpers niemals ganz.



Rechter Amboß. *A* Mediale Fläche. *B* Ansicht von vorn. *c* Körper, *b* kurzer, *l* langer Fortsatz. *pl* Proc. lenticularis. * Gelenkfläche für den Kopf des Hammers. ** Auf der Wand der Paukenhöhle ruhende Fläche.

Der Amboß, einzeln dargestellt in Fig. 41, hat etwa die Gestalt eines zweiwurzeligen Backzahnes, dessen Kaufläche das Gelenk (* Fig. 41) gegen den Hammer bildet. Von den beiden etwas weit auseinander gespreizten Wurzeln des Zahnes heißt die obere, welche nach hinten gerichtet ist, der kurze Fortsatz *b*, die andere dünnere nach unten gerichtete der lange Fortsatz *l* des Ambosses. Letztere trägt an ihrer Spitze das Gelenkköpfchen für den Steigbügel. Die Spitze des kurzen Fortsatzes dagegen ist durch eine kurze Bandmasse und ein unvollständig ausgebildetes Gelenk an ihrer unteren Fläche mit der hinteren Wand der Paukenhöhle verbunden, da, wo diese nach hinten in die Lufthöhlen des hinter dem Ohr gelegenen Zitzenfortsatzes übergeht. Das Gelenk zwischen Amboß und Hammer ist von einer ziemlich unregelmäßigen, im ganzen sattelförmigen Flächenkrümmung. Seiner Wirkung nach ist es zu vergleichen mit den Gelenken der viel verbreiteten, mit Sperrzähnen versehenen Uhr-

schlüssel, welche in einer Richtung ohne erheblichen Widerstand frei gedreht werden können, in entgegengesetzter Richtung aber, wenn sich ihre Sperrzähne aufeinander stemmen, nicht die kleinste Drehung erlauben. Solche Sperrzähne hat das Hammer-Amboßgelenk namentlich an seiner unteren Seite ausgebildet, und zwar liegt der des Hammers außen, dem Trommelfell zugewendet, der des Ambosses innen, während umgekehrt gegen das obere Ende der Gelenkgrube hin der Amboß mehr nach außen übergreift, der Hammer nach innen. Die Folge dieser Konstruktion ist, daß, wenn der Hammer mit seinem Stiel nach innen gezogen wird, er den Amboß ganz fest packt und mitnimmt. Umgekehrt, wenn das Trommelfell mit dem Hammer nach außen getrieben wird, braucht der Amboß nicht mitzugehen. Die Sperrzähne der Gelenkflächen weichen dann voneinander, und diese gleiten mit sehr geringer Reibung aneinander hin. Es hat dies zunächst den großen Vorteil, daß der Steigbügel nicht aus dem ovalen Fenster ausgerissen werden kann, wenn die Luft im Gehörgang erheblich verdünnt wird. Eintreibung des Hammers, wie sie durch Verdichtung der Luft im Gehörgang entstehen könnte, ist ebenfalls ohne Gefahr, da sie durch die Spannung des trichterförmig eingezogenen Trommelfelles selbst kräftig gehemmt wird.

Wird bei einer Schlingbewegung Luft in die Trommelhöhle eingeblasen, so wird die Berührung von Hammer und Amboß gelockert. Dann hört man schwache Töne aus den mittleren und höheren Gegenden der Skala nicht merklich schwächer als sonst, wohl aber bemerkt man eine sehr beträchtliche Dämpfung starker Töne. Dies dürfte daraus zu erklären sein, daß die Adhäsion der Gelenkflächen aneinander genügt, um schwache Bewegungen von einem auf den anderen Knochen zu übertragen, während sie bei stärkeren Anstößen aneinander gleitend sich verschieben können und solche daher nicht mehr ungeschwächt übertragen.

Tiefe Töne sind bei jeder Stärke gedämpft, wohl weil diese immer ausgiebigere Bewegungen erfordern, um hörbar zu werden[1]).

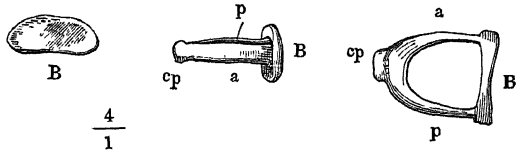
Einen anderen wichtigen Einfluß, welchen die beschriebene Konstruktion des Hammer-Amboßgelenkes auf die Wahrnehmung

[1]) Siehe darüber unten Abt. II, Abschnitt 9.

der Töne hat, werde ich unten bei den Kombinationstönen besprechen.

Da die Befestigung der Spitze des kurzen Fortsatzes des Steigbügels merklich nach innen und oben vom Achsenband des Hammers liegt, so entfernt sich der Kopf des Hammers vom Amboß-Paukengelenk, wenn ersterer nach außen und der Hammerstiel mit dem Trommelfell nach innen getrieben wird. Das hat zur Folge, daß die Bänder, die den Amboß am Hammer und an der Spitze seines kurzen Fortsatzes festhalten, merklich gedehnt werden, und daß letztere Spitze etwas von ihrer knöchernen Unterlage abgehoben wird. Bei dieser normalen Stellung der Knöchelchen zum Hören hat daher der Amboß gar keine weitere Berührung mit anderen Knochen als mit dem Hammer, sondern beide Knochen sind dann nur durch gespannte Bandmassen festgestellt, und zwar ziemlich straff, so daß nur die Drehung um das Achsenband des Hammers verhältnismäßig ungehindert bleibt.

Fig. 42 a. Fig. 42 b. Fig. 42 c.



4/1

Rechter Steigbügel; Fig. 42 a von innen, Fig. 42 b von vorn, Fig. 42 c von unten.
B Basis. *cp* Capitulum. *a* Vorderer, *p* hinterer Schenkel.

Das dritte Knöchelchen, der Steigbügel, einzeln dargestellt in Fig. 42 a, b, c, hat in der Tat die auffallendste Ähnlichkeit mit dem Gerät, nach dem es genannt ist. Die Fußplatte *B* ist in der Membran des ovalen Fensters befestigt, welche sie bis auf einen schmalen Saum fast ganz ausfüllt. Das Köpfchen *cp* hat ein Gelenkgrübchen für die Spitze (Processus lenticularis) des langen Fortsatzes des Ambosses. Das Gelenk ist mit einer schlaffen Membran umgeben. Bei normal einwärtsgezogenem Trommelfell drückt der Amboß auf den Steigbügel, so daß eine straffere Bandbefestigung des Gelenkes nicht nötig ist. Jede verstärkte Eintreibung des Hammers vom Trommelfell aus bewirkt auch eine stärkere Eintreibung des Steigbügels in das ovale Fenster, wobei aber der obere etwas losere Rand seiner Fußplatte sich stärker verschiebt als der untere, und daher das Köpfchen sich etwas hebt, welcher Bewegung auch wieder eine schwache Hebung der Spitze des langen Amboßfortsatzes entspricht, wie sie durch die Lage derselben nach innen und unten vom Achsenband des Hammers bedingt wird.

Die Exkursionen der Steigbügelplatte sind sehr klein und übersteigen nach meinen Messungen[1]) jedenfalls nicht $^1/_{10}$ mm. Die freie Exkursion des Hammers dagegen mit dem Stiel nach außen, welche er machen kann, indem er sich gegen den Amboß im Gelenk verschiebt, ist mindestens neunmal so groß, als die er mit dem Amboß und Steigbügel zusammen ausführen kann.

Der ganze Trommelhöhlenapparat hat zunächst den mechanischen Nutzen, daß die Schallbewegung von der verhältnismäßig ausgedehnten Fläche des Trommelfelles (vertikaler Durchmesser 9 bis 10 mm, horizontaler 7,5 bis 9 mm) aufgefangen und durch die Knöchelchen auf die verhältnismäßig viel kleinere Fläche des ovalen Fensters oder der Fußplatte des Steigbügels übertragen wird, deren Durchmesser nur 1,5 und 3 mm betragen. Somit ist die Fläche des Trommelfelles 15 bis 20 mal größer, als die des ovalen Fensters.

Bei dieser Übertragung der Luftschwingungen auf das Labyrinthwasser ist nun zu bemerken, daß die Luftteilchen zwar verhältnismäßig große Amplituden ihrer Schwingungen zeigen, aber wegen ihrer geringen Dichtigkeit kein großes Trägheitsmoment haben, daher auch, wenn sie durch das Trommelfell in ihrer Bewegung gehemmt werden, keinen großen Widerstand gegen diese Hemmung leisten und auch keinen erheblichen Druck gegen das hemmende Trommelfell ausüben. Das Labyrinthwasser ist dagegen viel dichter und schwerer als die Luft des Gehörganges, und um es schnell hin und her zu treiben, wie es bei den Schalloszillationen geschieht, sind viel erheblichere Druckkräfte nötig, als für die Luft des Gehörganges. Andererseits sind aber auch die Amplituden der Schwingungen, welche das Labyrinthwasser ausführt, verhältnismäßig sehr klein, und außerordentlich kleine Schwingungen sind hier genügend, um die zum Teil an der Grenze des mikroskopischen Sehens liegenden Endgebilde und Anhänge der Nerven hinreichend hin und her zu bewegen, so daß Empfindung erregt wird.

Die mechanische Aufgabe des Trommelhöhlenapparates ist also, eine Bewegung von großer Amplitude und geringer Kraft, welche

[1]) Helmholtz, Die Mechanik der Gehörknöchelchen in Plügers Archiv für Physiologie 1, 34—43. (Wiss. Abh. 2, 515.) Dieser Aufsatz sucht überhaupt die hier gegebene Darstellung der Mechanik des Ohres zu begründen.

das Trommelfell trifft, zu verwandeln in eine von geringer Amplitude und größerer Kraft, die dem Labyrinthwasser mitzuteilen ist.

Es ist dies eine Aufgabe, wie sie durch vielerlei mechanische Apparate, als Hebel, Flaschenzüge, Krane usw. gelöst wird. Die Art, wie dies im Trommelhöhlenapparat geschieht, ist ganz abweichend und sehr eigentümlich.

Eine Hebelwirkung wird zwar auch benutzt, aber nur in geringem Maße. Die Spitze des Hammerstieles, auf welche der Zug des Trommelfelles zunächst einwirkt, ist allerdings etwa anderthalb Mal so weit von der Drehungsachse entfernt, als die Spitze des Ambosses, welche auf den Steigbügel drückt, wie unter anderen Fig. 39 erkennen läßt. Der Hammerstiel bildet also den längeren Hebelarm, und der Druck auf den Steigbügel wird anderthalb Mal so groß sein, als die Kraft, welche die Spitze des Hammerstieles eintreibt.

Die Hauptverstärkung wird aber durch die Form des Trommelfelles bedingt. Ich habe schon erwähnt, daß die Mitte desselben, oder sein Nabel, trichterförmig durch den Stiel des Hammers nach innen gezogen ist. Die vom Nabel nach dem Rande gezogenen Meridianlinien dieses Trichters sind aber nicht gerade gestreckt, sondern schwach konvex nach außen. Verminderter Luftdruck im Gehörgang erhöht diese Konvexität, vermehrter Druck vermindert sie. Nun ist die Spannung sehr beträchtlich, welche in einem unausdehnbaren Faden, der die Form eines sehr flachen Bogens hat, dadurch entsteht, daß eine schwache Kraft senkrecht gegen seine Wölbung wirkt. Es ist bekannt, daß man eine erhebliche Kraft anwenden muß, um einen langen dünnen Strick horizontal auch nur erträglich geradlinig auszuspannen, eine Kraft, welche außerordentlich viel größer ist, als die Schwere des Fadens, die diesen aus der geraden Linie nach abwärts zieht. Am Trommelfell ist es nun nicht die Schwere, welche die Radialfasern desselben sich zu strecken verhindert, sondern es ist teils der Luftdruck, teils der elastische Zug, den die Ringfasern der Membran ausüben. Diese streben sich zusammenzuziehen gegen die Achse der trichterförmigen Membran hin und bringen dadurch die Einbiegung der Radialfasern gegen die Achse hin hervor. Durch den wechselnden Luftdruck während der Schallschwingungen der äußeren Luft wird dieser Zug der Ringfasern bald verstärkt, bald geschwächt, was auf die mittlere Befestigungs-

stelle der Radialfasern an der Spitze des Hammerstieles so wirkt, als könnten wir die Schwere des horizontal gespannten Fadens abwechselnd verstärken und vermindern, was eine proportionale Verstärkung und Schwächung des Zuges, den der Faden auf die haltende Hand ausübt, hervorbringen würde.

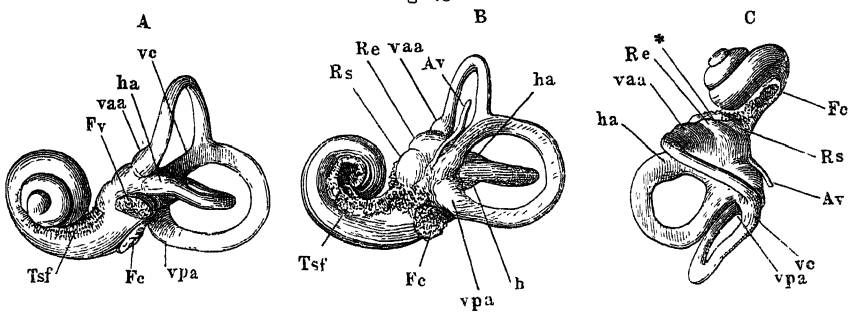
Bei einem solchen horizontal ausgespannten Faden ist ferner zu bemerken, daß ein außerordentlich geringes Nachgeben der Hand schon eine beträchtliche Senkung der Mitte des Fadens nach sich zieht. Das Nachgeben der Hand geschieht nämlich in der Richtung der Sehne des Bogens, und eine leichte geometrische Betrachtung lehrt, daß die Sehnen von Bögen gleicher Länge und verschiedener, aber immer sehr geringer Wölbung untereinander und von der Länge des Bogens selbst außerordentlich wenig[1]) abweichen. Dies gilt nun ebenso vom Trommelfell. Der Stiel des Hammers braucht nur außerordentlich wenig nachzugeben, um doch eine ziemlich beträchtliche Veränderung in der Wölbung des Trommelfelles zuzulassen. Die Folge davon ist, daß bei den Schallschwingungen die Teile des Trommelfelles, welche mitten zwischen dem inneren Ansatz der Membran am Hammer und dem äußeren Ansatz am Paukenring liegen, ziemlich ausgiebig den Oszillationen der Luft folgen können, während ihre Bewegung auf den Hammerstiel mit sehr verminderter Amplitude, aber sehr vermehrter Kraft übertragen wird. Beim Übergang der Bewegung vom Hammerstiel auf den Steigbügel erfolgt dann noch eine weitere mäßigere Reduktion der Schwingungsweite mit entsprechender Vermehrung der Kraft durch die oben erwähnte Hebelwirkung.

Wir gehen jetzt über zur Beschreibung der innersten Abteilung des Gehörorganes, welche den Namen des Labyrinthes trägt. Ein Abguß seiner Höhlung ist in Fig. 43 von verschiedenen Seiten dargestellt. Der mittlere Teil desselben, an welchem sich das ovale Fenster *Fv* (Fenestra vestibuli) befindet, welches die Basis des Steigbügels aufnimmt, wird der Vorhof (Vestibulum) des Labyrinthes genannt. Von ihm geht nach vorn und unten ein aufgerollter Kanal,

[1]) Sie weichen ab um einen Betrag, der dem Quadrat der Tiefe der Wölbung proportional ist. Nennen wir die Länge des Bogens l, und die Entfernung seiner Mitte von der Sehne s, so ist die Sehne kürzer als der Bogen um die Größe $^8/_3 \frac{s^2}{l}$.

die Schnecke (Cochlea), ab, an deren Anfang das runde Fenster *Fc* (Fenestra cochleae) gegen die Trommelhöhle gewendet liegt. Nach oben und hinten dagegen gehen von dem Vorhof drei bogenförmige Gänge ab, der horizontale, vertikale vordere und vertikale hintere Bogengang, deren jeder mit beiden Enden in den Vorhof mündet, und deren jeder an einem Ende eine flaschenförmige Erweiterung oder Ampulle (*ha*, *vaa*, *vpa*) zeigt. Der in der Figur noch dargestellte Aquaeductus vestibuli scheint (nach Herm Fr. E. Webers Untersuchungen) eine Kommunikation des Labyrinthwassers mit

Fig. 43.



A Linkes Labyrinth, von außen. *B* Rechtes Labyrinth, von innen. *C* Linkes Labyrinth, von oben. *Fc* Fenestra cochleae. *Fv* Fenestra vestibuli. *Re* Recessus ellipticus. *Rs* Recessus sphaericus. *h* Horizontaler Bogengang. *ha* Ampulle desselben. *vaa* Ampulle des vorderen vertikalen Bogenganges. *vpa* Ampulle des hinteren vertikalen Bogenganges. *vc* Gemeinschaftlicher Schenkel der beiden vertikalen Bogengange. *Av* Abguß des Aquaeductus vestibuli. *Tsf* Tractus spiralis foraminosus. * Abgüsse des auf der Pyramis vestibuli mündenden Kanälchens.

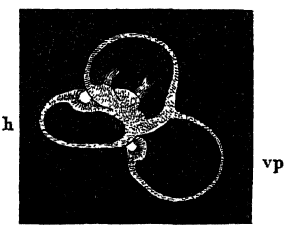
Lymphräumen der Schädelhöhle herzustellen; die rauhen Stellen *Tsf* und * entsprechen im Abguß den Kanälen, welche die Nerven zuführen.

Diese ganze Höhlung des Labyrinthes ist mit Wasser gefüllt und umgeben von der außerordentlichen harten und dichten Knochenmasse des Felsenbeines, so daß nur zwei nachgiebige Stellen der Wand übrig bleiben, nämlich die beiden Fenster *Fv* und *Fc*, das ovale und das runde. Im ersteren steht, wie schon beschrieben, die Fußplatte des Steigbügels durch einen schmalen membranösen Saum eingeheftet; das letztere ist durch eine Membran geschlossen. Wird der Steigbügel eingetrieben gegen das ovale Fenster, so wird demnach die ganze Flüssigkeitsmasse des Labyrinthes gegen das runde Fenster gedrängt, nur hier kann die Membran desselben nachgeben. Setzt man, wie Politzer getan, bei übrigens unverletztem Labyrinth ein fein ausgezogenes Glasröhrchen als Manometer in das runde Fenster

ein, so wird das Wasser in diesem in die Höhe getrieben, sobald man stärkeren Luftdruck auf die äußere Seite des Trommelfelles wirken läßt und dadurch den Steigbügel in das ovale Fenster eindrängt.

Die Endigungen des Hörnerven befinden sich an feinen häutigen Gebilden, die zum Teil schwimmend, zum Teil ausgespannt in der Höhle des knöchernen Labyrinthes liegen und zusammen das häutige Labyrinth bilden. Dieses bildet im ganzen die Gestalt des knöchernen Labyrinthes nach; nur zeigt es geringere Weite der Kanäle und Höhlungen, und sein Rauminhalt zerfällt in zwei getrennte Abteilungen, nämlich einerseits den Utriculus mit den Bogengängen, und andererseits den Sacculus mit dem häutigen Schneckenkanal. Utriculus und Sacculus liegen beide im Vorhof des knöchernen Labyrinthes, ersterer dem Recessus ellipticus (*Re*, Fig. 43), letzterer dem Recessus sphaericus (*Rs*) gegenüber. Es sind schwimmende, selbst mit Wasser gefüllte Säckchen, die nur an einer Seite, wo die Nervenfasern zu ihnen treten, der Wand anliegen.

Fig. 44.



2/1

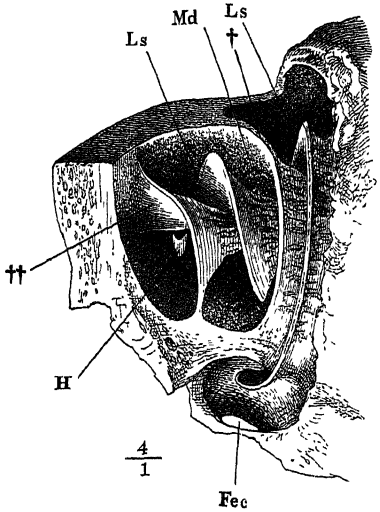
Utriculus und häutige Bogengange (der linken Seite) von außen. *v a* vorderer, *v p* hinterer vertikaler Bogengang, *h* horizontaler Bogengang.

Die Form des Utriculus mit den häutigen Bogengängen ist abgebildet in Fig. 44. Die Ampullen sind an den häutigen Bogengängen viel stärker hervorragend als an den knöchernen. Die häutigen Bogengänge selbst sind nach den neueren Untersuchungen von Rüdinger nicht schwimmend in der knöchernen, sondern an der konvexen Seite des knöchernen Kanales angeheftet. An jeder Ampulle findet sich eine wulstige, nach innen gewendete Hervorragung, in welche Fäden des Hörnerven eintreten, eine flachere verdickte Stelle am Utriculus. Die besondere Art, wie die Nerven hier enden, wird unten beschrieben werden. Ob dieselben mit dem ganzen Apparat der Bogengänge der Gehörsempfindung dienen, ist neuerdings äußerst zweifelhaft geworden.

Im Inneren des Utriculus befindet sich durch eine schleimige Masse unter sich, sowie mit der verdickten nervenreichen Stelle des Säckchens verbunden der aus kleinen Kalkkristallen bestehende Gehörsand. Neben dem Utriculus und ihm angeheftet, aber nicht mit ihm kommunizierend, liegt in der Höhle des knöchernen Vorhofes der

Sacculus mit einer ähnlichen verdickten nervenreichen Stelle seiner Wand versehen. Durch einen engen Kanal steht er mit dem Kanal der häutigen Schnecke in Verbindung. Was die Höhlung der Schnecke betrifft, so ist diese, wie Fig. 43 zeigt, der des Gehäuses einer Weinbergschnecke durchaus ähnlich, nur ist der Schneckenkanal des Ohres durch eine quer verlaufende teils knöcherne, teils häutige Scheidewand in zwei fast vollständig voneinander getrennte Gänge getrennt. Nur an der Spitze der Schnecke bleibt eine kleine Kommunikationsöffnung zwischen den beiden Gängen, das Helicotrema, begrenzt durch das hakenförmige Ende der Spindel, den Hamulus. Von den beiden Gängen, in welche der Kanal der knöchernen Schnecke getrennt wird, kommuniziert der eine direkt mit dem Vorhof und wird deshalb die Vorhofstreppe (Scala vestibuli) genannt. Der andere Gang ist dagegen vom Vorhof abgesperrt durch die häutige Scheidewand; doch liegt in seinem Anfang nächst der Basis der Schnecke das runde Fenster, durch dessen nachgiebige Membran er Erschütterungen mit der Luft der Paukenhöhle austauschen kann. Dieser zweite Gang wird deshalb die Paukentreppe (Scala tympani) genannt.

Fig. 45.

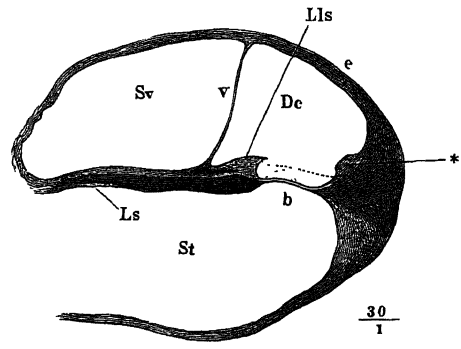


Knöcherne (rechte) Schnecke, von vorn geöffnet. *Md* Modiolus. *Ls* Lamina spiralis. *H* Hamulus. *Fec* Fenestra cochleae. † Durchschnitt der Zwischenwand der Schnecke, †† Oberes Ende derselben.

Endlich ist weiter zu bemerken, daß die häutige Scheidewand nicht eine einfache Membran ist, sondern selbst ein häutiger Kanal (Ductus cochlearis), der mit seinem inneren, gegen die Achse der Schnecke gekehrten Rande an die rudimentäre knöcherne Scheidewand (Lamina spiralis) der Schnecke angeheftet ist, mit einem Teil der gegenüberliegenden äußeren Fläche dagegen an die innere Fläche des knöchernen Ganges. Fig. 45 stellt die knöchernen Teile einer aufgebrochenen Schnecke dar, Fig. 46 einen Querschnitt des Kanales (nach links unten hin unvollständig geblieben). An beiden bezeichnet

Ls den knöchernen Teil der Scheidewand, in Fig. 46 *v* und *b* die beiden freien Teile des häutigen Kanales. Der Querschnitt dieses Kanales ist, wie die Figur zeigt, nahehin dreieckig, so daß ein Winkel des Dreieckes bei *Lls* an den Rand der knöchernen Scheidewand angeheftet ist. Der Anfang des Ductus cochlearis an der Basis der Schnecke kommuniziert, wie schon angegeben ist, mit dem Sacculus im Vorhof des Labyrinthes durch einen engen häutigen Kanal. Von den beiden freien Streifen seiner häutigen Begrenzung ist der gegen die Vorhoftreppe gekehrte eine zarte, wenig Widerstand leistende Membran, die Reissnersche Membran, *v*, Fig. 46 (Membrana vestibularis), der andere die Membrana basilaris, *b* ist dagegen eine feste, straff gespannte elastische Membran, die in radialer Richtung, ihren starken Radialfasern entsprechend, gestreift ist. Sie spaltet sich leicht in der Richtung dieser Fasern, was anzeigt, daß ihr Zusammenhang quer gegen ihre Radialfasern nicht sehr fest ist. Auf der Membrana basilaris sind die Enden des Schneckennerven und deren Anhänge befestigt, was in Fig. 46 durch punktierte Linien angedeutet ist.

Fig. 46.



Querdurchschnitt einer Schneckenwindung aus einer in Salzsäure erweichten Schnecke. *Ls* Lamina spiralis. *Lls* Limbus laminae spiralis. *Sv* Scala vestibuli. *St* Scala tympani. *Dc* Ductus cochlearis. *v* Membrana vestibularis. *b* Membrana basilaris. *e* Äußere Wand des Ductus cochlearis. * Wulst derselben. Die punktierten Linien bedeuten Durchschnitte der Membrana tectoria und der Gehorstäbchen.

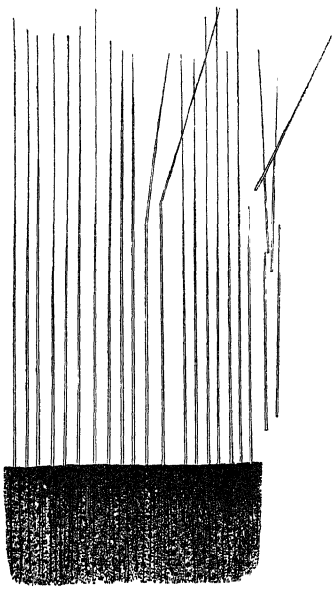
Wenn das Paukenfell durch vermehrten Luftdruck im Gehörgang nach innen getrieben wird, drängt es, wie oben auseinander gesetzt ist, auch die Gehörknöchelchen nach innen, und namentlich tritt dabei die Fußplatte des Steigbügels tiefer in das ovale Fenster ein. Die Flüssigkeit des Labyrinthes, welche übrigens rings von festen Knochenwänden eingeschlossen ist, hat nur einen Ausweg, wohin sie vor dem Druck des Steigbügels ausweichen kann, nämlich das runde Fenster mit seiner nachgiebigen Membran. Um dahin zu gelangen, muß aber die Labyrinthflüssigkeit entweder durch das Helicotrema, die enge Öffnung in der Spitze der Schnecke, hinüberfließen von der Vorhofs-

treppe zur Paukentreppe, oder, da hierzu bei den Schallschwingungen wahrscheinlich nicht genügende Zeit ist, die membranöse Scheidewand der Schnecke gegen die Paukentreppe hindrängen. Das Umgekehrte muß bei Luftverdünnung im Gehörgang geschehen.

So werden also die Schallschwingungen der im äußeren Gehörgang enthaltenen Luft schließlich übertragen auf die Membranen des Labyrinthes, namentlich die Schneckenmembran, und die dort ausgebreiteten Nerven.

Ich habe schon erwähnt, daß die Endausbreitungen dieser Nerven verbunden sind mit sehr kleinen elastischen Anhängen, die dazu bestimmt zu sein scheinen, durch ihre Schwingungen die Nerven in Erregung zu versetzen.

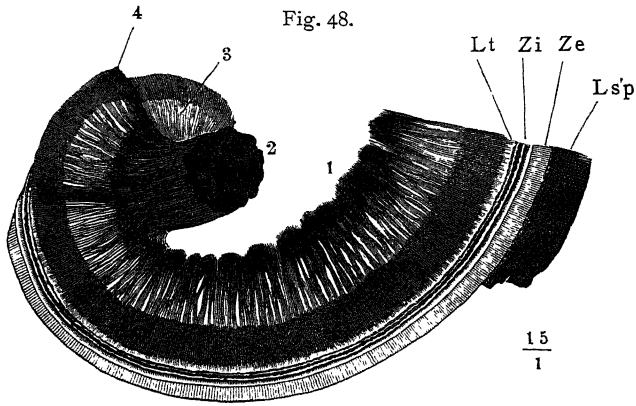
Fig. 47.



Was zunächst die Nerven des Vorhofes betrifft, so enden sie an den vorher erwähnten verdickten Stellen der Säckchen des häutigen Labyrinthes, wo das Gewebe auch größere, fast knorpelartige Festigkeit hat. Eine solche mit Nerven versehene Stelle tritt in Form einer Leiste in dem Inneren der Ampulle eines jeden Bogenganges hervor, eine andere liegt an jedem der Säckchen des Vorhofes. Die Nervenfasern treten hier zwischen die zarten zylindrischen Zellen des feinen Häutchens (Epithelium), welches die innere Fläche der Leisten überzieht. In den Ampullen ragen, nach Max Schultzes Entdeckung, aus der inneren Fläche dieses Epitheliums ganz eigentümliche, steife, elastische Haare hervor, welche in Fig. 47 abgebildet sind. Sie sind viel länger als die Wimperhärchen der Flimmerzellen (beim Rochen $^1/_{25}$ Linie lang), zerbrechlich und laufen in eine sehr feine Spitze aus. Dergleichen feine und steife Härchen sind offenbar in hohem Grade geeignet, von den Bewegungen der Flüssigkeit mitbewegt zu werden und dabei eine mechanische Reizung der in dem weichen Epithelium zwischen ihrer Basis liegenden Nervenfäden hervorzubringen.

Die betreffenden verdickten Leisten in den Vorhöfen, in welchen die Nervenenden liegen, zeigen nach Max Schultze dasselbe zarte Epithelium, in welches die Nervenfasern sich einsenken, und kurze leicht zerstörbare Haare. Ferner liegen ganz nahe der nervenreichen Oberfläche kalkige Konkremente, die sogenannten Hörsteine (Otolithen), welche bei den Fischen zusammenhängende konvexkonkave Teilchen sind und an der konvexen Seite einen Eindruck von der Nervenleiste zeigen. Beim Menschen dagegen sind die Otolithen Häufchen kleiner kristallinischer Körperchen von länglich eckiger Gestalt, welche der Membran der Säckchen eng anliegen und an dieser

Fig. 48.



festgeheftet zu sein scheinen. Auch diese Otolithen erscheinen in hohem Grade geeignet, bei jeder plötzlichen Bewegung des Labyrinthwassers eine mechanische Reizung der Nervenmasse auszuüben. Die feine und leichte Membran mit der eingewebten Nervenmasse folgt wahrscheinlich der Bewegung des Wassers augenblicklich, während die schwereren Kristallchen langsamer in Bewegung gesetzt werden und auch ihre Bewegung wieder langsamer abgeben, so daß sie dabei die benachbarte Nervenmasse teils zerren, teils pressen mögen. Dadurch werden aber die Bedingungen zur Reizung der Nerven ganz ähnlich wie in Heidenhains Tetanomotor erfüllt. In diesem Instrument wird ein Muskelnerv der Einwirkung eines sehr schnell schwingenden Elfenbeinhämmerchens ausgesetzt, so daß der Nerv bei jedem Schlage zwar gepreßt, aber nicht zerdrückt wird. Man erhält dadurch eine kräftige und anhaltende Erregung des Nerven, die sich durch eine

anhaltende kräftige Zusammenziehung des von ihm abhängigen Muskels zu erkennen gibt. Für eine solche Art mechanischer Erregung erscheinen auch im Ohr die beschriebenen Teile passend angeordnet zu sein.

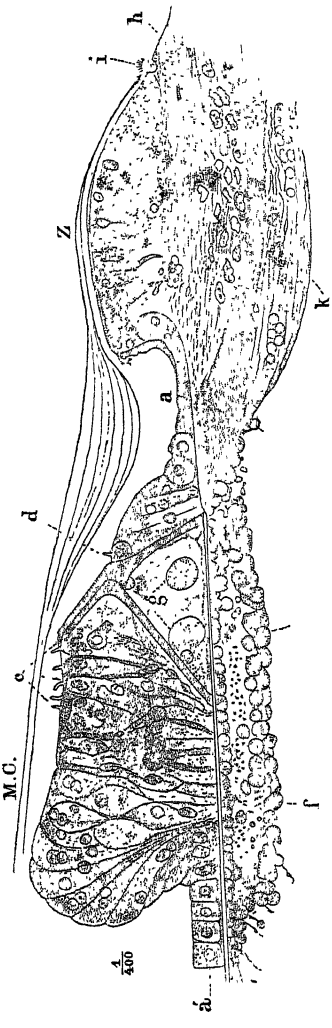


Fig. 49.

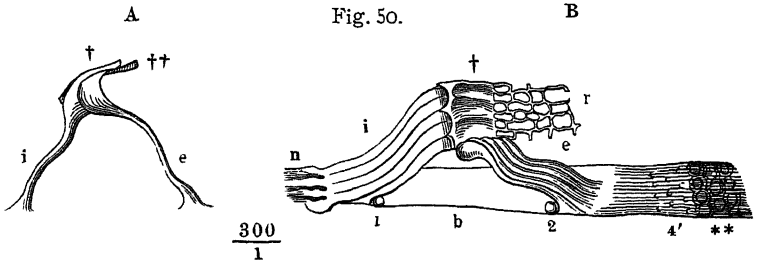
Viel komplizierter ist der Bau der Schnecke. Die Nervenfasern treten durch die Achse oder Spindel der Schnecke zunächst in den knöchernen Teil der Scheidewand, dann auf den häutigen; wo sie diesen erreichen, finden sich eigentümliche, erst in neuester Zeit vom Marchese Corti entdeckte Gebilde, nach ihm das Cortische Organ genannt, an welchen die Nerven endigen.

Die Ausbreitung des Schneckennerven ist dargestellt in Fig. 48. Derselbe tritt durch die Achse der Schnecke ein (2) und sendet seine Fasern in radialer Richtung von da durch die knöcherne Scheidewand (1, 3 und 4 der Figur) bis zu deren Rand vor; hier treten die Nerven zunächst unter den Anfang der Membrana basilaris, durchbohren diese dann in einer Reihe von Öffnungen, so daß sie in den Ductus cochlearis gelangen und zu den nervösen und elastischen Gebilden, die auf der inneren Zone (*Zi*) der Membran liegen.

Der Rand der knöchernen Scheidewand (*a* bis *b*) und die innere Zone der Membrana basilaris (*a a'*) sind dargestellt nach Hensen in Fig. 49; die untere Seite der Zeichnung entspricht der Scala tympani, die obere dem Ductus cochlearis. Hierin sind *h* und *k* die beiden Blätter der knöchernen Scheidewand, zwischen denen die Ausbreitung der Nerven *b* sich hindurchzieht. Die obere Seite der knöchernen

Scheidewand trägt, wie auch Fig. 46 bei *Lls* zeigt, eine aus dichter Bindegewebsmasse bestehende Leiste (*Z*, Fig. 49), die wegen der zahnförmigen Eindrücke auf ihrer oberen Seite als die Zahnleiste bezeichnet wird, und von welcher eine besondere elastische und durchlöcherte Membran, die Cortische Membran, *MC*, getragen wird, die der Membrana basilaris parallel bis zur Knochenwand an der äußeren Seite des Ganges ausgespannt ist und sich dort etwas oberhalb der ersteren anheftet. Zwischen den genannten beiden Membranen liegen nun die Teile, in und an denen die Nervenfasern enden.

Fig. 50.



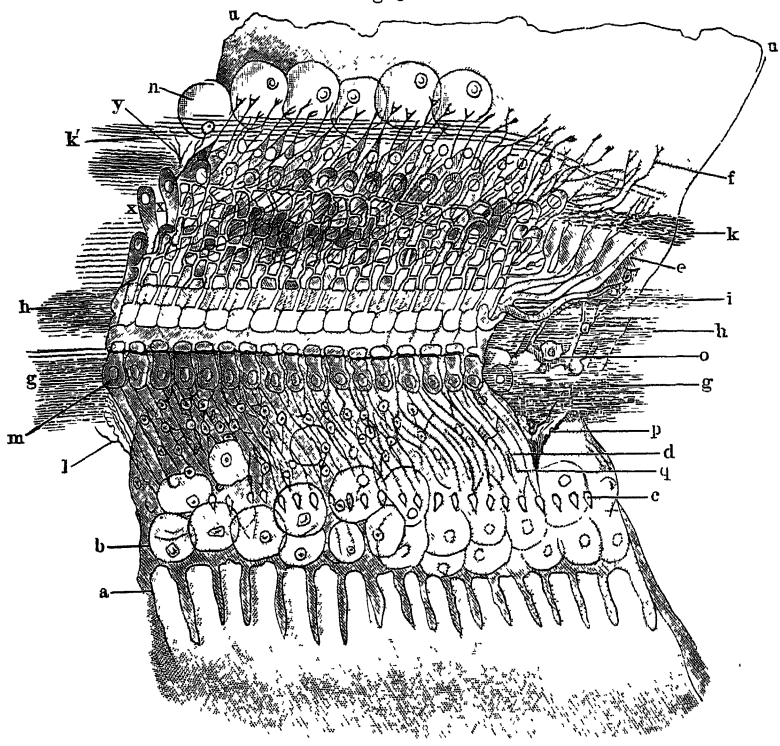
A Äußeres und inneres Stäbchen in Verbindung, Profilansicht. *B* Membrana basilaris (*b*) mit den terminalen Nervenbündeln (*n*) und den inneren und äußeren Stäbchen (*i* u. *e*). 1 Innere, 2 äußere Bodenzelle. 4' Anheftungen der Deckzellen. ** Epithelium.

Unter diesen sind die relativ festesten Gebilde die Cortischen Bögen (Fig. 49 über *g*). Die Reihe dieser nebeneinander liegenden Bögen besteht aus zwei Reihen von Stäbchen oder Fasern, einer inneren und einer äußeren. Ein einzelnes Paar derselben ist in Fig. 50 *A*, eine kleine Reihe ebenda unter *B* dargestellt, letztere an der Membrana basilaris festhaftend, und bei † noch in Verbindung mit dem gefensterten Gerüst, in welches sich die weiter zu beschreibenden Endzellen der Nerven (*c*, Fig. 49) einfügen. Von Seite der Vorhofstreppe gesehen, sind diese Gebilde in Fig. 51 dargestellt; *a* ist hier die Zahnleiste, *c* die Öffnungen für den Nerven am inneren Rande der Membrana basilaris, deren äußerer Rand bei *uu* sichtbar ist; *d* ist die innere Reihe der Cortischen Stäbe, *e* die äußere Reihe; über letzterer sieht man zwischen *e* und *x* die gefensterte Membran, an welche sich die Nervenendzellen anlegen.

Die Fasern erster Reihe sind platte, schwach Sförmig gekrümmte Gebilde, die mit einer unteren Endanschwellung von der Grundmembran aufsteigen, an welche sie angeheftet sind, und oben mit einer Art

Gelenkstück endigen, welches zur Verbindung mit den Fasern zweiter Reihe bestimmt ist. In Fig. 51 bei *d* sieht man eine große Zahl dieser aufsteigenden Fasern regelmäßig nebeneinander liegen. In derselben Weise sind sie auf der ganzen Länge der Schneckenmembran dicht nebeneinander gestellt, so daß man ihre Zahl auf viele Tausend schätzen muß. Ihre Seiten legen sich dicht an die der Nachbarn an,

Fig. 51.



und scheinen sich selbst mit diesen zu verbinden, aber so, daß stellenweise offene Spalten in der Verbindungslinie stehen bleiben, durch welche wahrscheinlich Nervenfasern durchtreten. So bilden die Fasern erster Reihe zusammengenommen eine Art steifer Leiste, die sich, sobald die natürlichen Befestigungen keinen Widerstand mehr leisten, steil aufrecht zu stellen strebt, wobei sich die Grundmembran zwischen den Ansatzstellen der Cortischen Bögen *d* und *e* zusammenfaltet.

Die Fasern zweiter Reihe, welche den absteigenden Teil des Bogens *e*, Fig. 50, bilden, sind glatte biegsame zylindrische Fäden mit

verdickten Enden. Das obere Ende bildet eine Art Gelenkstück zur Verbindung mit den Fasern erster Reihe, das untere Ende ist glockenförmig erweitert und haftet der Grundmembran fest an. In den mikroskopischen Präparaten sieht man sie meist mannigfaltig gebogen; doch kann wohl kein Zweifel darüber sein, daß sie in ihrer natürlichen Verbindung gestreckt und einigermaßen gespannt sind, so daß das obere Gelenkende der Fasern erster Reihe durch sie herabgezogen wird. Während die Fasern erster Reihe vom inneren Rande der Membran aufsteigen, welcher verhältnismäßig wenig erschüttert werden kann, heften sich die Fasern zweiter Reihe ziemlich in der Mitte der Membran an, also gerade da, wo deren Schwingungen am ausgiebigsten sein müssen. Wird der Druck des Labyrinthwassers in der Paukentreppe durch den in das ovale Fenster eindrängenden Steigbügel vermehrt, so muß die Grundmembran nach unten weichen, die Faser zweiter Reihe stärker gespannt werden, und vielleicht wird die entsprechende Stelle der ersten Faserreihe etwas nach unten gebogen. Übrigens erscheint es nicht sehr wahrscheinlich, daß die Fasern erster Reihe sich einzeln viel bewegen, denn ihre seitlichen Verbindungen sind doch stark genug, daß, wenn man sie bei der anatomischen Präparation von ihrer Befestigung löst, sie zuweilen in langen Reihen zusammenhängend bleiben, wie eine Art Membran. Daß das Cortische Organ ein Apparat sei, geeignet, die Schwingungen der Grundmembran aufzunehmen und selbst in Schwingung zu geraten, darüber kann die ganze Anordnung keinen Zweifel lassen, aber es läßt sich mit unseren gegenwärtigen Kenntnissen noch nicht sicher bestimmen, in welcher Weise diese Schwingungen vor sich gehen. Dazu müßte man die Festigkeit der einzelnen Teile, den Grad ihrer Spannung und ihrer Biegsamkeit erst besser beurteilen können, als es die bisherigen Beobachtungen an den isolierten Teilen, wie sie sich eben zufällig unter dem Mikroskop gelagert haben, erkennen lassen.

Die Cortischen Fasern sind nun umsponnen und umgeben von einer Menge sehr zarter und vergänglicher Gebilde, Fasern und Zellen verschiedener Art, teils feinsten Ausläufern von Nervenfasern mit zugehörigen Nervenzellen, teils Bindegewebsfasern, welche als ein Stützapparat zur Befestigung und Suspension der Nervengebilde zu dienen scheinen.

Fig. 49 zeigt diese Teile am besten im Zusammenhang. Sie gruppieren sich als ein Wulst weicher Zellen auf beide Seiten und

in dem Inneren der Cortischen Bögen. Die wichtigsten darunter scheinen die mit Härchen versehenen Zellen bei *c* und *d* zu sein, welche ganz die Bildung der Härchenzellen in den Ampullen und im Utriculus haben. Sie scheinen direkt mit feinen, varikösen Nervenfasern zusammenzuhängen, und bilden den konstantesten Teil unter den Gebilden der Schnecke, denn bei den Vögeln und Reptilien, wo die Struktur der Schnecke viel einfacher ist, und selbst die Cortischen Bögen fehlen, sind es gerade diese Härchenzellen, die man überall wiederfindet und deren Härchen so gestellt sind, daß sie an die Cortische Membran bei den Schwingungen der Membrana basilaris anstoßen können. Die Zellen bei *a* und a_1, Fig. 49, die sich in Fig. 51 bei *b* und *n* in aufgeschwollenerem Zustande zeigen, scheinen nur den Charakter eines Epitheliums zu haben. In Fig. 51 sieht man außerdem Faserzüge und Fasernetze, die teils nur Stützfasern bindegewebiger Natur sein mögen, teils durch ihr perlschnurartiges Aussehen sich als feinste Nervenfaserzüge charakterisieren. Es sind gerade diese Teile so zart und vergänglich, daß über ihren Zusammenhang und ihre Bedeutung noch vielfache Zweifel bestehen.

Das wesentliche Ergebnis unserer Beschreibung des Ohres fassen wir demnach dahin zusammen, daß wir die Enden des Hörnerven überall mit besonderen, teils elastischen, teils festen Hilfsapparaten verbunden gefunden haben, welche unter dem Einfluß äußerer Schwingungen in Mitschwingung versetzt werden können, und dann wahrscheinlich die Nervenmasse erschüttern und erregen. Nun ist schon im dritten Abschnitt auseinander gesetzt worden, daß die Vorgänge des Mittönens für die Beobachtung ein sehr verschiedenes Verhalten zeigen, je nachdem der mitschwingende Körper, einmal in Bewegung gesetzt, lange nachtönt, oder seine Bewegung schnell verliert. Körper, welche, einmal angeschlagen, lange nachtönen, wie Stimmgabeln, sind des Mittönens in hohem Grade fähig, trotz der Schwerbeweglichkeit ihrer Masse, weil sie eine lange Summierung der an sich sehr kleinen Anstöße zulassen, welche jede einzelne Schwingung des erregenden Tones auf sie ausübt. Aber eben deshalb muß auch die allergenaueste Übereinstimmung herrschen zwischen dem eigenen Ton der Gabel und der Tonhöhe des erregenden Tones, weil sonst die Anstöße durch die späteren Luftschwingungen nicht fortdauernd regelmäßig in dieselbe Schwingungsphase fallen können, wo sie die Nachwirkungen

der früheren Anstöße verstärken. Nimmt man dagegen Körper, deren Ton schnell verklingt, z. B. aufgespannte Membranen oder dünne, leichte Saiten, so werden diese ebenfalls die Erscheinung des Mittönens zeigen, wenn die schwingende Luft Gelegenheit hat, auf sie einzuwirken, aber ihr Mittönen wird nicht so beschränkt auf eine gewisse Tonhöhe sein, sie werden von ziemlich verschiedenartigen Tönen leicht bewegt werden. Denn wenn ein elastischer Körper einmal angestoßen und danach frei forttönend nach 10 Schwingungen seine Bewegung nahehin verloren hat, wird es nicht darauf ankommen, ob neue Anstöße, die er nach Ablauf dieser Zeit empfängt, mit den früheren vollständig übereinstimmend wirken, wie es bei einem anderen tönenden Körper nötig sein würde, bei welchem die durch den ersten Anstoß erzeugte Bewegung noch fast unverändert besteht, wenn ihn der zweite Anstoß trifft. Im letzteren Falle wird der zweite Anstoß die Bewegung nur dann vermehren können, wenn er gerade in eine solche Phase der Schwingung fällt, wo seine Richtung mit der schon bestehenden zusammentrifft.

Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Verhältnissen läßt sich ganz unabhängig von der Natur des mittönenden Körpers genau berechnen, und da dies für die Beurteilung der Verhältnisse im Ohr wichtig ist, habe ich hier folgend eine kleine Tabelle dafür gegeben [1]). Man denke sich einen mittönenden Körper, der zuerst durch einen genau gleichgestimmten Ton in das Maximum der Schwingung versetzt sei; der erregende Ton werde nun geändert, bis die Intensität des Mitschwingens bis auf $^1/_{10}$ des früheren Wertes verringert ist. Die Größe dieser Tondifferenz ist in der ersten Kolumne der folgenden Tabelle angegeben. Nun sei derselbe tönende Körper angeschlagen worden und man lasse ihn ungehindert austönen. Es werde beobachtet, nach wieviel seiner Schwingungen die Intensität seines Tones auf $^1/_{10}$ ihres Anfangswertes reduziert sei. Die Anzahl dieser Schwingungen ist in der zweiten Kolumne angegeben.

Wenn wir nun auch für das Ohr und dessen einzelne Teile noch nicht genau ermitteln können, wie lange sie nachklingen, so lassen uns doch bekannte Erfahrungen ungefähr beurteilen, in welche Gegend der in unserer Tabelle aufgestellten Skala die Teile des Ohres etwa

[1]) Die Art ihrer Berechnung ist in Beilage X näher auseinander gesetzt.

Differenz der Tonhöhe, durch welche die Intensität des Mitschwingens auf $^1/_{10}$ reduziert wird	Zahl der Schwingungen, nach welcher die Intensität des ausklingenden Tones auf $^1/_{10}$ reduziert wird
1. Ein achtel Ton	38,00
2. Ein viertel Ton	19,00
3. Ein halber Ton	9,50
4. Drei viertel Ton	6,33
5. Ein ganzer Ton	4,75
6. Fünf viertel Ton	3,80
7. Kleine Terz ($^3/_2$ Ton) . . .	3,17
8. Sieben viertel Ton	2,71
9. Große Terz (2 Töne) . . .	2,37

zu stellen sein müssen. Es können im Ohr natürlich keine Teile vorhanden sein, die etwa so lange wie eine Stimmgabel nachklingen, denn das würde sich schon der gewöhnlichen Beobachtung gleich verraten. Aber auch, wenn im Ohr Teile wären, welche nur der ersten Stufe unserer Tafel entsprechen und 38 Schwingungen brauchten, um bis auf $^1/_{10}$ auszuklingen, so würden wir dies bei tieferen Tönen erkennen. Denn 38 Schwingungen erfordern beim *A* ein Drittel einer Sekunde, beim *a* ein Sechsteil, beim *a'* ein Zwölfteil usw. So langes Nachklingen würde jede schnelle Bewegung innerhalb der ungestrichenen und eingestrichenen Oktave unmöglich machen; es würde, wenn es im Ohr selbst stattfände, für Musik ebenso störend sein, wie starke Resonanz in einem gewölbten Raume, oder Entfernung des Dämpfers am Pianoforte. Beim Trillern können wir sehr gut 8 bis 10 Anschläge in der Sekunde machen, so daß jeder der beiden Töne vier- oder fünfmal angeschlagen wird. Wenn nun der erste Ton vor dem Ende des zweiten noch nicht verklungen ist, oder wenigstens so weit vermindert ist, daß man ihn neben dem anderen nicht mehr wahrnimmt, so würden die beiden Töne des Trillers nicht jeder für sich deutlich hervortreten, sondern man würde fortdauernd ein Gemisch beider Töne hören. Dergleichen Triller von je 10 Schlägen auf die Sekunde sind nun im größten Teil der Skala scharf und klar auszuführen, aber allerdings vom *A* abwärts in der großen und Kontraoktave klingen sie schlecht und rauh und ihre Töne fangen an sich zu vermischen. Es läßt sich auch leicht zeigen, daß hieran nicht der Mechanismus der Instrumente schuld ist. Wenn man z. B. auf

der Physharmonika trillert, so sind die Tasten der tiefen Töne genau ebenso gebaut und ebenso leicht zu bewegen als die der höheren. Jeder einzelne Ton ist ganz sicher und vollständig abgeschnitten, sobald die Klappe auf den Luftkanal gefallen ist, und jeder spricht auch in dem Moment an, wo die Klappe geöffnet wird, weil die Zungen während einer so kurzen Unterbrechung in Schwingung bleiben. Ähnlich ist es am Violoncell. In dem Moment, wo der trillernde Finger auf die Saite gesetzt ist, muß diese in die andere Schwingungsperiode übergehen, die ihrer jetzigen Länge entspricht; und in dem Moment, wo der Finger entfernt ist, muß die Vibration eintreten, die dem früheren Ton entspricht, und doch ist der Triller in der Tiefe so unvollkommen, wie auf jedem anderen Instrument. Auf dem Klavier sind Läufe und Triller in der Tiefe noch verhältnismäßig am besten auszuführen, weil in dem Augenblick des Anschlages der neue Ton mit großer und schnell abnehmender Intensität erklingt. Daher hört man wenigstens neben dem unharmonischen Lärm, den das gleichzeitige Bestehen beider Töne hervorbringt, auch die einzelnen Töne scharf hervordringen. Da die Schwierigkeit, in der Tiefe schnell zu trillern, also für alle musikalischen Instrumente dieselbe ist und an einzelnen Instrumenten erweislich von der Weise, wie die Töne hervorgebracht werden, ganz unabhängig ist, so müssen wir schließen, daß wir es hier mit einer Schwierigkeit zu tun haben, die im Ohr selber liegt. Es ist dies eine Erscheinung, welche deutlich darauf hinweist, daß die Dämpfung der schwingenden Teile für tiefe Töne im Ohr nicht genügend stark und schnell ist, um einen so raschen Wechsel von Tönen ungestört zustande kommen zu lassen.

Ja diese Tatsache beweist weiter, daß es verschiedene Teile des Ohres sein müssen, welche durch verschieden hohe Töne in Schwingung versetzt werden und diese Töne empfinden. Man könnte nämlich daran denken, daß die schwingungsfähige Masse des ganzen Ohres, Trommelfell, Gehörknöchelchen und Labyrinthwasser zusammengenommen schwingen könnte, und daß es von der Trägheit dieser Masse abhinge, wenn die Tonschwingungen im Ohr nicht gleich erlöschen. Aber eine solche Annahme würde nicht genügend sein, die besprochene Tatsache zu erklären. Wenn nämlich ein elastischer Körper durch einen Ton in Mitschwingung versetzt

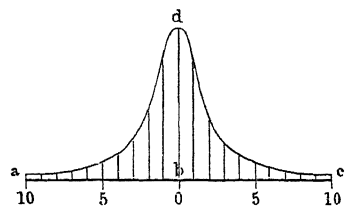
wird, so schwingt er mit in der Schwingungszahl des erregenden Tones; sowie der erregende Ton aufhört, klingt er aber aus in der Schwingungszahl seines eigenen Tones. Diese Tatsache, welche aus der Theorie folgt, läßt sich an Stimmgabeln mittels des Vibrationsmikroskops ganz scharf erweisen.

Wenn nun das Ohr als ganzes System schwingt, und eines merklichen Nachschwingens fähig ist, muß es dies tun in seiner eigenen Schwingungszahl, welche ganz unabhängig ist von der Schwingungszahl des vorausgegangenen Tones, der diese Schwingungen etwa erregt hat. Daraus würde also folgen, daß erstens die Triller auf hohen und tiefen Tönen gleich schwierig sein müßten, und zweitens, daß die beiden Töne des Trillers nicht miteinander sich vermischen könnten, sondern daß jeder sich vermischen würde mit einem dritten Ton, der dem Ohr selbst angehört. Einen solchen Ton haben wir schon kennen gelernt im vorigen Abschnitt, das hohe *f''''*. Der Erfolg würde also unter diesen Umständen ein ganz anderer sein, als wir ihn wirklich beobachten.

Wenn nun auf dem *A* von 110 Schwingungen ein Triller mit 10 Anschlägen in der Sekunde ausgeführt wird, so wird derselbe Ton nach je $^1/_5$ Sekunde immer wieder angeschlagen. Wir dürfen wohl annehmen, daß der Triller nicht klar sein würde, wenn die Intensität des ausklingenden Tones nach $^1/_5$ Sekunde nicht mindestens auf $^1/_{10}$ vermindert wäre. Daraus folgt, daß nach mindestens 22 Schwingungen die beim *A* mitschwingenden Teile des Ohres auf $^1/_{10}$ der früheren Tonstärke herabkommen müssen, wenn sie ausklingen, daß ihr Mitschwingen also nicht der ersten, wohl aber der zweiten, dritten oder einer noch höheren Stufe unserer Tafel entsprechen kann. Daß die Stufe wenigstens keine sehr viel höhere sein kann, geht zunächst daraus hervor, daß die Triller und Läufe schon auf wenig tiefer liegenden Tönen anfangen schwierig zu werden. Dasselbe werden später zu besprechende Beobachtungen über Schwebungen lehren. Wir werden im ganzen annehmen können, daß die mitschwingenden Teile im Ohr etwa den Grad der Dämpfung zeigen, der der dritten Stufe unserer Tabelle entspricht, wo die Intensität des Mitschwingens bei $^1/_2$ Tonstufe Differenz nur noch $^1/_{10}$ von der bei vollem Einklang ist. Es kann hier natürlich von einer genauen Bestimmung nicht die Rede sein, aber es ist schon wichtig, daß wir uns wenig-

stens einen annähernden Begriff von dem Einfluß der Dämpfung auf das Mitschwingen im Ohr machen. Es ist dies von einflußreicher Bedeutung für die Verhältnisse der Konsonanz. Wenn wir also im folgenden davon sprechen werden, daß einzelne Teile des Ohres für einen bestimmten Ton mittönen, so ist es so zu verstehen, daß sie durch diesen Ton zwar am stärksten in Bewegung gesetzt werden, in schwächerem Grade aber doch auch durch die benachbarten, so daß auch bei der Differenz eines halben Tones ihr Mitschwingen wenigstens noch merklich ist. Um eine Übersicht von dem Gesetz zu geben, nach welchem die Intensität des Mitschwingens abnimmt, wenn die Differenz der Tonhöhe zunimmt, diene die nebenstehende Fig. 52. Die Horizontallinie *abc* stellt einen Teil der musikalischen Skala vor, und zwar *ab* und *bc* jedes die Breite eines ganzen Tones. Ein mitschwingender Körper sei auf den Ton *b* gestimmt und die Vertikallinie *bd* bezeichne das Maximum der Intensität des Tones, welchen er bei vollem Einklang mit dem erregenden Ton gibt. Auf der Grundlinie ist die Breite eines ganzen Tones in Zehnteile geteilt, und die darüber stehenden Höhen bezeichnen die zugehörige Tonintensität des mitschwingenden Körpers, wenn der erregende Ton um die betreffende Differenz von dem Einklang abweicht.

Fig. 52.



Ich lasse hier die Zahlen folgen, nach denen die Fig. 52 konstruiert ist:

Differenz der Tonhöhe	Intensität des Mitschwingens	Differenz der Tonhöhe	Intensität des Mitschwingens
0,0	100,0	0,6	7,2
0,1	74,0	0,7	5,4
0,2	41,0	0,8	4,2
0,3	24,0	0,9	3,3
0,4	15,0	Ganzer Ton	2,7
Halber Ton	10,0		

Welche Teile im Ohr es nun sind, die bei den einzelnen Tönen mitschwingen, läßt sich allerdings nicht mit Sicherheit nachweisen. Für den Menschen und die Säugetiere können wir in dieser Beziehung

vorläufig nur Vermutungen aufstellen. Ihrer ganzen Konstruktion nach erscheint die Schneckenscheidewand mit den auf ihr gelagerten Cortischen Bögen am ehesten geeignet, selbständige Schwingungen auszuführen. Die Fähigkeit, lange Zeit ohne Unterstützung fortzuschwingen, brauchen wir ja auch nicht von ihnen zu verlangen.

Sollen diese Gebilde aber zur Unterscheidung von Tönen verschiedener Höhe dienen, und sollen Töne verschiedener Höhe aus allen Gegenden der Skala gleich gut perzipiert werden, so ist es nötig, daß die mit verschiedenen Nervenfasern verbundenen elastischen Gebilde in der Schnecke verschieden abgestimmt seien und ihre Eigentöne eine regelmäßige Stufenfolge durch die ganze Länge der musikalischen Skala bilden.

Den neueren anatomischen Ermittelungen von V. Hensen und C. Hasse zufolge ist es wahrscheinlich die verschiedene Breite der Membrana basilaris der Schnecke, auf der diese Abstimmung beruht[1]). Die genannte Membran ist an ihrem Anfang, dem ovalen Fenster gegenüber, verhältnismäßig schmal und wird immer breiter, je mehr sie sich der Kuppel der Schnecke nähert. V. Hensen hat bei einem Neugeborenen zwischen der Durchtrittslinie der Nervenfasern am inneren Rande bis zum Ansatz an das Ligamentum spirale am äußeren Rande folgende Maße gefunden:

Ort des Querschnittes	Breite der Membran mm
0,2625 mm von der Wurzel entfernt	0,04125
0,8626 „ „ „ „ „	0,0825
Zwei Viertel der ersten Windung	0,169
Ende der ersten Windung	0,3
Mitte der zweiten „	0,4125
Ende derselben	0,45
Am Hamulus	0,495

[1]) In der ersten Auflage dieses Buches, welche zu einer Zeit geschrieben wurde, wo die Studien über die feinere Anatomie der Schnecke noch erst in der Entwickelung begriffen waren, habe ich die Voraussetzung gemacht, daß die verschiedene Festigkeit und Spannung der Cortischen Stäbchen den Grund der verschiedenen Abstimmung geben könnte. Durch Hensens Messungen der Breite der Membrana basilaris (Zeitschr. f. wissenschaftl. Zoologie 13, 492) und Hasses Nachweis, daß die Cortischen Bögen bei den Vögeln und Amphibien fehlen, sind nun viel bestimmtere Anhaltspunkte für das Urteil gegeben, als ich damals hatte.

Die Breite wächst also vom Anfang bis zum Ende auf mehr als das Zwölffache.

Die Cortischen Stäbchen zeigen ebenfalls eine Größenzunahme gegen die Kuppel der Schnecke hin, aber in viel geringerem Maße als die Membrana basilaris. Es beträgt nach Hensen:

	Am runden Fenster mm	Am Hamulus mm
Die Länge des inneren Stäbchens	0,048	0,0855
„ „ „ äußeren „	0,048	0,098
„ Spannweite des Bogens	0,019	0,085

Daraus folgt, wie auch Henle bestätigt hat, daß die größte Zunahme der Breite auf die äußere Zone der Grundmembran fällt, jenseits der Ansatzlinie der äußeren Stäbchen. Diese wächst von 0,023 mm auf 0,41 mm, fast auf das Zwanzigfache.

Diesen Massen entsprechend stehen die beiden Reihen Cortischer Stäbchen am runden Fenster einander fast parallel steil in die Höhe, während sie gegen die Kuppel hin stärker gegeneinander geneigt sind.

Aus dem schon erwähnten Umstande, daß die Membrana basilaris der Schnecke sehr leicht in radialer Richtung zerreißt, während ihre radialen Fasern einen ziemlich hohen Grad von Festigkeit haben, scheint mir ein in mechanischer Beziehung sehr wichtiges Verhältnis zu folgen, daß nämlich diese Membran auch in ihrer natürlichen Befestigung zwar in der Richtung quer von der Spindel gegen die äußere Schneckenwand stark gespannt sein kann, jedenfalls aber in Richtung ihrer Länge nur schwach gespannt ist. In dieser Richtung würde sie nämlich einer stärkeren Spannung gar nicht widerstehen können.

Nun verhält sich, wie die mathematische Theorie zeigt[1]), eine Membran, welche nach verschiedenen Richtungen hin verschieden gespannt ist, bei ihren Schwingungen sehr viel anders, als es eine nach allen Richtungen hin gleich gespannte Membran tun würde. Auf letzterer verbreiten sich Schwingungen, die auf einem Teil eingeleitet sind, gleichmäßig nach allen Richtungen hin, und es würde bei gleichmäßiger Spannung unmöglich sein, einen Teil der Membrana

[1]) Siehe Beilage XI.

basilaris in Schwingung zu versetzen, ohne nahehin ebenso starke Schwingungen, abgesehen von etwa sich bildenden einzelnen Knotenlinien, in allen anderen Teilen der Membran hervorzurufen.

Wenn aber die Spannung in Richtung der Länge verschwindend klein ist gegen die Spannung in Richtung der Breite, dann verhält sich die Membrana basilaris annähernd so, als wären ihre Radialfasern ein System von gespannten Saiten, deren membranöse Querverbindung nur dazu dient, dem Druck der Flüssigkeit gegen diese Saiten eine Handhabe zu geben. Dann werden die Gesetze ihrer Bewegung dieselben sein, als wäre jede einzelne dieser Saiten in ihrer Bewegung unabhängig von der anderen und folgte, jede für sich, der Einwirkung des periodisch wechselnden Druckes des Labyrinthwassers in der Vorhofstreppe. Es würde demnach ein erregender Ton namentlich diejenige Stelle der Membran in Mitschwingen versetzen, wo der Eigenton der gespannten und mit den verschiedenen Anhangsgebilden belasteten Radialfasern der Membran dem erregenden Ton am nächsten entspricht; von da würden sich die Schwingungen in schnell abnehmender Stärke auf die benachbarten Teile der Membran ausbreiten. Die Fig. 52 auf Seite 237 würde geradezu mit übertriebener Höhe den Längsschnitt derjenigen Gegend der schwingenden Membrana basilaris darstellen können, wo der Eigenton der Radialfasern der Membran dem erregenden Ton am nächsten entspricht.

Die größere oder geringere Beschränkung des stark schwingenden Teiles der Membran würde, wie schon vorher für die mitschwingenden Körper im allgemeinen auseinander gesetzt ist, von dem Grad der Dämpfung abhängen, den die Schwingungen der Membran durch die benachbarten Teile erleiden, namentlich durch die Reibung im Labyrinthwasser und in den gallertartigen weichen Teilen des Nervenwulstes.

Es werden unter diesen Umständen diejenigen Teile der Membran, welche mit den höheren Tönen im Einklang sind, in der Nähe des runden Fensters, die für die tieferen Töne in der Nähe der Kuppel der Schnecke zu suchen sein, wie dies schon Hensen aus seinen Messungen gefolgert hat. Daß so kurze Saiten dennoch auf so tiefe Töne antworten können, würde sich erklären durch den Umstand, daß die genannten Saiten der Membrana basilaris stark belastet

sind mit allerlei festen Gebilden, namentlich kommt aber auch das Wasser der beiden Schneckentreppen als Belastung in Betracht, da sich ohne eine Art Wellenbewegung in diesem die Membran gar nicht bewegen kann.

Was die Cortischen Bögen auf der Grundmembran der Schnecke betrifft, so zeigen zunächst die Beobachtungen von Hasse, daß sie in der Schnecke der Vögel und Amphibien fehlen, während die übrigen wesentlichen Teile der Schnecke, namentlich die Membrana basilaris, die mit den Nervenenden in Verbindung stehenden haartragenden Zellen und die den Enden dieser Härchen gegenübergestellte Cortische Membran auch dort vorhanden sind. Daraus wird nun allerdings sehr wahrscheinlich, daß die Cortischen Bögen nur eine Nebenrolle in den Leistungen der Schnecke spielen. Man könnte den Nutzen der Cortischen Bögen vielleicht darin suchen, daß sie als relativ feste Gebilde die Schwingungen der Grundmembran auf abgegrenzte enge Bezirke des oberen Teiles des relativ dicken Nervenwulstes besser übertragen, als dies durch unmittelbare Mitteilung der Schwingungen von der Grundmembran durch die weiche Masse dieses Wulstes hindurch geschehen würde. Ganz dicht von dem oberen Ende des Bogens nach außen und mit ihm noch durch die steiferen Faserzüge der *Membrana reticularis* verbunden, stehen die härchentragenden Zellen des Nervenwulstes (s. Fig. 49 bei *c*). Bei den Vögeln dagegen bilden die härchentragenden Zellen eine dünne Schicht auf der Grundmembran, welche abgegrenzte Schwingungen derselben leicht aufnehmen wird, ohne sie allzu weit nach den Seiten hin mitzuteilen.

Dieser Ansicht gemäß würden es also in letzter Instanz die Cortischen Bögen sein, welche, von der Grundmembran aus erschüttert, deren Schwingungen den Endorganen der Nervenleitung mitteilten. In diesem Sinne bitte ich es weiterhin zu verstehen, wenn von Schwingungen, Eigenton, Abstimmung der Cortischen Bögen die Rede ist; es ist dann immer die Abstimmung, wie sie sie durch ihre Verbindung mit dem betreffenden Teil der Grundmembran erhalten, gemeint.

Nach Waldeyer sind etwa 4500 äußere Bogenfasern in der menschlichen Schnecke enthalten. Rechnen wir 300 auf die außerhalb der in der Musik gebrauchten Grenzen liegenden Töne, deren Tonhöhe nur unvollkommen aufgefaßt wird, so bleiben 4200 für die

sieben Oktaven der musikalischen Instrumente, d. h. 600 für jede Oktave, 50 für jeden halben Ton, jedenfalls genug, um die Unterscheidung kleiner Teile eines halben Tones, soweit eine solche möglich ist, zu erklären. Nach Herrn W. Preyers Untersuchungen können geübte Musiker in der zweigestrichenen Oktave Unterschiede von 0,5 einer Schwingung in der Sekunde sicher erkennen. Das wären 1000 unterscheidbare Tonstufen in der Oktave zwischen 500 und 1000 Schwingungen für die Sekunde. Gegen die Grenzen der Skala hin ist die Unterscheidungsfähigkeit eine geringere. Mit Berücksichtigung davon erscheinen die 4200 Cortischen Bögen wohl als ausreichend, um diesen Grad von Feinheit der Unterscheidung herzustellen. Aber selbst wenn sich herausstellen sollte, daß eine viel größere Zahl als 4200 Tonstufen in der ganzen Skala unterscheidbar wären, so läge darin kein Hindernis für unsere Annahme. Denn wenn ein Ton angegeben wird, dessen Höhe zwischen der von zwei benachbarten Cortischen Bögen liegt, so wird er beide in Mitschwingung versetzen, denjenigen aber stärker, dessen eigenem Ton er näher liegt. Wie kleine Abstufungen der Tonhöhe in dem Intervall zweier Fasern wir noch werden unterscheiden können, wird also schließlich nur abhängen von der Feinheit, mit welcher die Erregungsstärke der beiden entsprechenden Nervenfasern verglichen werden kann. Eben daher erklärt es sich, daß bei kontinuierlich steigender Höhe des äußeren Tones auch unsere Empfindung sich kontinuierlich verändert und nicht stufenweise springt, wie es der Fall sein müßte, wenn immer nur je ein Cortischer Bogen in Mitschwingen versetzt würde.

Ziehen wir weiter die Folgerungen aus unserer Hypothese. Wird ein einfacher Ton dem Ohr zugeleitet, so müssen diejenigen Cortischen Bögen, die mit ihm ganz oder nahehin im Einklang sind, stark erregt werden, alle anderen schwach oder gar nicht. Es wird also jeder einfache Ton von bestimmter Höhe nur durch gewisse Nervenfasern empfunden werden, und verschieden hohe Töne werden verschiedene Nervenfasern erregen. Wenn ein zusammengesetzter Klang oder ein Akkord dem Ohr zugeleitet wird, so werden alle diejenigen elastischen Gebilde erregt werden, deren Tonhöhe den verschiedenen in der Klangmasse enthaltenen einzelnen Tönen entspricht, und bei gehörig gerichteter Aufmerksamkeit werden also auch alle die ein-

zelnen Empfindungen der einzelnen einfachen Töne einzeln wahrgenommen werden können. Der Akkord wird in seine einzelnen Klänge, der Klang in seine einzelnen harmonischen Töne zerlegt werden müssen.

Dadurch würde nun auch eine Erklärung dafür gewonnen sein, warum das Ohr die Luftbewegungen gerade in pendelartige Schwingungen zerlegt. Jedes einzelne Luftteilchen kann zu jeder Zeit natürlich nur eine Bewegung ausführen. Daß wir eine solche Bewegung in der mathematischen Theorie als eine Summe von pendelartigen Schwingungen betrachteten, war zunächst eine willkürliche Fiktion, zur Bequemlichkeit der Theorie eingeführt, ohne eine reelle Bedeutung. Eine solche haben wir für diese Zerlegung erst in der Betrachtung des Mitschwingens gefunden, da eine periodische Bewegung, die nicht pendelartig ist, Körper von verschiedener Tonhöhe, entsprechend den harmonischen Obertönen, zum Mittönen bringen kann. Und nun haben wir durch unsere Hypothese auch die Phänomene des Hörens auf solche des Mittönens zurückgeführt, und finden darin den Grund, warum die ursprünglich einfache periodische Bewegung der Luft eine Summe von verschiedenen Empfindungen hervorbringt und deshalb auch für die Wahrnehmung als zusammengesetzt erscheint.

Die Empfindung verschiedener Tonhöhen wäre hiernach also eine Empfindung in verschiedenen Nervenfasern. Die Empfindung der Klangfarbe würde darauf beruhen, daß ein Klang außer den seinem Grundton entsprechenden Cortischen Bögen noch eine Anzahl anderer in Bewegung setzte, also in mehreren verschiedenen Gruppen von Nervenfasern Empfindungen erregte.

In physiologischer Beziehung ist hier noch zu bemerken, daß durch diese Annahme die verschiedene Qualität der Gehörempfindungen nach Tonhöhe und Klangfarbe zurückgeführt wird auf die Verschiedenheit der Nervenfasern, welche in Erregung versetzt werden. Es ist dies ein Schritt ähnlicher Art, wie ihn in einem größeren Gebiete Johannes Müller durch seine Lehre von den spezifischen Sinnesenergien getan hat. Er hat nachgewiesen, daß der Unterschied der Empfindungen verschiedener Sinne nicht abhängig sei von den äußeren Einwirkungen, welche die Empfindung erregen, sondern von den verschiedenen Nervenapparaten, welche sie aufnehmen. Wir können uns durch den Versuch davon überzeugen, daß der Gesichtsnerv und seine

Ausbreitung, die Netzhaut des Auges, wie sie auch gereizt werden mögen, durch Licht, durch Zerrung, durch Druck oder durch Elektrizität, immer nur Lichtempfindung haben, daß die Tastnerven dagegen immer nur Tastempfindungen, nie Lichtempfindung oder Gehörempfindung oder Geschmacksempfindungen hervorbringen. Dieselben Sonnenstrahlen, welche vom Auge als Licht empfunden werden, empfinden die Nerven der Hand als Wärme, dieselben Erschütterungen, welche die Hand als Schwirren empfindet, empfindet das Ohr als Ton.

Wie das Ohr Schwingungen von verschiedener Dauer als Töne verschiedener Höhe auffaßt, erregen Ätherschwingungen von verschiedener Dauer im Auge die Empfindung verschiedener Farben; die schnellsten die des Violett und Blau, die mittleren des Grün und Gelb, die langsamsten des Rot. Die Gesetze der Farbenmischung führten Thomas Young zu der Hypothese, daß es im Auge dreierlei Nervenfasern gebe, denen verschiedene Art der Empfindung zukäme, nämlich rotempfindende, grünempfindende und violettempfindende. In der Tat gibt diese Annahme eine sehr einfache und vollständig konsequente Erklärung sämtlicher Gesichtserscheinungen, die sich auf die Farben beziehen. Dadurch werden also die qualitativen Unterschiede der Gesichtsempfindungen zurückgeführt auf die Verschiedenartigkeit der empfindenden Nerven. Es bleiben dann für die Empfindungen jeder einzelnen Sehnervenfaser nur die quantitativen Unterschiede stärkerer und schwächerer Reizung übrig.

Dasselbe tut die Hypothese, auf welche uns unsere Untersuchung der Klangfarbe geführt hat, für das Gehör. Die Verschiedenheiten der Qualität des Tones, nämlich Tonhöhe und Klangfarbe, werden zurückgeführt auf die Verschiedenheit der empfindenden Nervenfasern, und für jede einzelne Nervenfaser bleiben nur die Unterschiede der Stärke der Erregung übrig.

Die Reizungsvorgänge innerhalb der Muskelnerven, durch deren Reizung die Muskeln zur Zusammenziehung bestimmt werden, sind der physiologischen Untersuchung mehr zugänglich gewesen, als die in den Sinnesnerven. Dort finden wir in der Tat nur den Unterschied stärkerer und schwächerer Erregung, keine qualitativen Unterschiede. Dort können wir nachweisen, daß im Zustand der Erregung die elektrisch wirksamen Teilchen der Nerven bestimmte Verände-

rungen erleiden, welche stets in gleicher Weise eintreten, durch welche Art von Reizmittel auch der Erregungszustand hervorgerufen sein mag. Genau dieselbe Veränderung tritt aber auch in den gereizten Empfindungsnerven ein, obgleich hier der Erfolg der Reizung eine Empfindung ist, dort eine Bewegung war, und wir sehen daraus, daß der Mechanismus des Reizungsvorganges in den Empfindungsnerven dem in den Bewegungsnerven durchaus ähnlich sein muß. Die beiden genannten Hypothesen führen nun in der Tat die Vorgänge in den Nerven der beiden vornehmsten Sinne des Menschen, trotz der scheinbar so verwickelten qualitativen Unterschiede der Empfindungen, auf dasselbe einfache Schema zurück, welches wir von den Bewegungsnerven kennen. Man hat die Nerven vielfach nicht unpassend mit Telegraphendrähten verglichen. Ein solcher Draht leitet immer nur dieselbe Art elektrischen Stromes, der bald stärker, bald schwächer oder auch entgegengesetzt gerichtet sein kann, aber sonst keine qualitativen Unterschiede zeigt. Dennoch kann man, je nachdem man seine Enden mit verschiedenen Apparaten in Verbindung setzt, telegraphische Depeschen geben, Glocken läuten, Minen entzünden, Wasser zersetzen, Magnete bewegen, Eisen magnetisieren, Licht entwickeln usw. Ähnlich in den Nerven. Der Zustand der Reizung, der in ihnen hervorgerufen werden kann und von ihnen fortgeleitet wird, ist, soweit er sich an der isolierten Nervenfaser erkennen läßt, überall derselbe, aber nach verschiedenen Stellen teils des Gehirns, teils der äußeren Teile des Körpers hingeleitet, bringt er Bewegungen hervor, Absonderungen von Drüsen, Ab- und Zunahme der Blutmenge, der Röte und der Wärme einzelner Organe, dann wieder Lichtempfindungen, Gehörempfindungen usw. Wenn jede qualitativ verschiedene Wirkung der Art in verschiedenartigen Organen hervorgebracht wird, zu denen auch gesonderte Nervenfasern hingehen müssen, so kann der Vorgang der Reizung in den einzelnen Fasern überall ganz derselbe sein, wie der elektrische Strom in den Telegraphendrähten immer derselbe ist, was für verschiedenartige Wirkungen er auch an den Enden hervorbringen möge. Solange wir dagegen annehmen, daß dieselbe Nervenfaser verschiedenartige Empfindungen leitet, würden auch verschiedene Arten des Reizungsvorganges in ihr vorhanden sein müssen, die wir bisher nachzuweisen noch nicht imstande gewesen sind.

In dieser Beziehung hat also die hingestellte Ansicht, ebensogut wie die Hypothese von Young über den Unterschied der Farben, noch eine weitere Bedeutung für die Nervenphysiologie im allgemeinen.

Seit der ersten Veröffentlichung dieses Buches ist die hier vorgetragene Theorie der Gehörempfindungen in einer interessanten Weise durch die Beobachtungen und Versuche von V. Hensen[1]) an den Gehörorganen der Crustaceen bestätigt worden. Diese Tiere haben teils geschlossene, teils nach außen offene Otolithensäckchen, in denen Hörsteinchen frei in wässeriger Flüssigkeit schweben, getragen von eigentümlich gebildeten Härchen, die mit ihren Enden den Steinchen anhaften, und zum Teil eine nach der Größe geordnete Reihenfolge, von größeren und dickeren zu kürzeren und feineren übergehend, zeigen. Außerdem finden sich bei vielen Krebsen ganz ähnliche Härchen auch an der freien Fläche des Körpers, welche für Hörhaare gehalten werden müssen. Der Beweis, daß auch diese äußeren Haare zum Hören bestimmt seien, beruht einmal auf der Ähnlichkeit ihres Baues mit dem der Haare in den Otolithensäckchen. Dann aber fand Hensen die Fähigkeit des Hörens erhalten, nachdem er bei Mysis die Otolithensäckchen exstirpiert und nur die äußeren Hörhärchen der Antennen erhalten hatte.

Hensen leitete den Schall eines Klapphornes durch einen dem Trommelfell und den Gehörknöchelchen nachgebildeten Apparat in das Wasser eines kleinen Kästchens, in welchem ein Exemplar von Mysis befestigt war, so daß man durch das Mikroskop die äußeren Hörhaare des Schwanzes beobachten konnte. Dabei zeigte sich, daß gewisse Töne des Hornes einzelne Härchen in starke Vibration setzten, andere Töne andere Härchen. Jedes Härchen antwortete auf mehrere Noten des Hornes, und man kann aus den angegebenen Noten annähernd die Reihe der Untertöne eines und desselben Tones herauserkennen. Ganz rein konnten die Resultate nicht sein, da die Resonanz des zuleitenden Apparates Einfluß haben mußte.

So antwortete eines dieser Härchen stark auf *dis* und *dis'*, schwächer auf *g*, sehr schwach auf *G*. Dies läßt vermuten, daß seine Stimmung

[1]) Studien über das Gehörorgan der Decapoden. Leipzig 1863. Abgedruckt aus Siebold und Köllikers Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie, Bd. 13.

zwischen *d''* und *dis''* lag. Dann entsprach es dem zweiten Partialton der Note *d' — dis'*, dem dritten von *g — gis*, dem vierten von *d — dis* und dem sechsten von *G — Gis*. Ein zweites Härchen antwortete stark auf *ais* und benachbarte Töne, schwächer auf *dis* und *Ais*. Dessen Eigenton scheint *ais* gewesen zu sein.

Durch diese Beobachtungen, von deren Richtigkeit mich zu überzeugen ich durch Herrn Hensens Gefälligkeit selbst Gelegenheit gehabt habe, ist die Existenz solcher Verhältnisse, wie wir sie für die menschliche Schnecke vorausgesetzt haben, für die genannten Crustaceen direkt erwiesen, was von um so größerem Wert ist, als wir bei der verborgenen Lage und der leichten Zerstörbarkeit der betreffenden Organe des menschlichen Ohres wenig Aussicht haben, jemals einen so direkten Beweis der verschiedenen Stimmung seiner einzelnen Teilchen führen zu können.

Die bis hierher vorgetragene Theorie bezieht sich zunächst nur auf die dauernde Empfindung, welche regelmäßige, andauernde, periodische Oszillationen hervorbringen. Was nun die Wahrnehmung unregelmäßiger Luftbewegungen, d. h. der Geräusche betrifft, so wird ein elastischer, zur Ausführung von Schwingungen geeigneter Apparat keiner zeitweilig auf ihn einwirkenden Kraft gegenüber in absoluter Ruhe bleiben können, und auch eine momentan oder in unregelmäßiger Wiederholung andringende Bewegung, wenn sie nur stark genug ist, wird ihn in Bewegung setzen. Der eigentümliche Vorzug der Resonanz auf den Eigenton beruht nur eben darin, daß unverhältnismäßig schwache einzelne Anstöße, wenn sie in richtigem Rhythmus sich folgen, verhältnismäßig ausgiebige Bewegungen hervorzubringen imstande sind. Momentane starke Anstöße dagegen, wie z. B. die durch einen elektrischen Funken hervorgebrachten, werden sämtliche Teile der Membrana basilaris in fast gleich starke Anfangsgeschwindigkeit versetzen können, wonach dann jeder dieser Teile in seiner eigentümlichen Schwingungsperiode austönen wird. Dadurch würde eine gleichzeitige und wenn auch nicht gleich starke, doch gleichmäßig sich abstufende Erregung sämtlicher Schneckennerven entstehen können, die also nicht den Charakter einer bestimmten Tonhöhe haben würde. Selbst ein schwacher Eindruck auf so viele Nervenfasern wird wahrscheinlich eine deutlichere Wirkung haben, als jeder einzelne Eindruck für sich. Wir wissen wenigstens,

daß schwache Helligkeitsunterschiede eher auf großen Teilen des Sehfeldes wahrgenommen werden als auf kleinen, und daß wir geringe Temperaturunterschiede eher bemerken, wenn wir den ganzen Arm in das warme Wasser eintauchen, als wenn wir nur einen Finger eintauchen.

So wäre also eine Wahrnehmung momentaner Stöße sehr wohl möglich durch die Schneckennerven, und zwar in der Weise, wie Geräusche empfunden werden, nämlich ohne ein besonderes merkliches Hervortreten einer bestimmten Tonhöhe.

Dauert der Druck der andringenden Luft auf das Trommelfell etwas länger, so wird dadurch schon die Bewegung in einzelnen Gegenden der Membrana basilaris begünstigt werden können gegen die in anderen Gegenden der Skala. Gewisse Tonhöhen werden vorzugsweise hervortreten. Man kann sich das so vorstellen, daß jeder Augenblick des Druckes als ein solcher betrachtet wird, der eine in Richtung und Stärke entsprechende und dann abklingende Bewegung in jeder Saite der Membrana basilaris erregt, und daß alle die auf solche Weise in jeder Faser erregten Bewegungen sich zueinander addieren, wobei sie sich nach Umständen verstärken oder schwächen werden[1]). So würde ein gleichmäßig anhaltender Druck die Exkursion der schwingenden Masse steigern, wenn er während der ersten halben Schwingungsdauer derselben anhält, solange also die erste positive Exkursion dauert. Wenn er aber länger anhält, schwächt er die zuerst erregte Wirkung wieder. Schneller schwingende elastische Massen werden also durch einen solchen verhältnismäßig weniger erregt werden als die, deren halbe Schwingungsdauer gleich oder größer ist als die Dauer des Druckes. Dadurch wird ein solcher Eindruck schon eine gewisse, wenn auch schwach begrenzte Tonhöhe bekommen. Im allgemeinen scheint die Intensität der Empfindung bei gleicher lebendiger Kraft der Bewegung nach der Höhe hin zuzunehmen, so daß immer der Eindruck der höchsten gleich stark erregten Fasern überwiegt.

Noch auffallender kann eine bestimmte Tonhöhe natürlich heraustreten, wenn der auf den Steigbügel wirkende Druck selbst ein oder mehrere Male zwischen positiv und negativ wechselt, und so können

[1]) Siehe den mathematischen Ausdruck hierfür am Schluß der Beilage XI.

alle Stufen von Übergängen zwischen Geräuschen ohne bestimmte Tonhöhe und Klängen mit einer solchen zustande kommen. Dies ist in der Tat der Fall, und darin liegt eben auch der Nachweis, wie Herr S. Exner[1]) mit Recht hervorgehoben hat, daß solche Geräusche von denjenigen Teilen des Ohres perzipiert werden müssen, die der Unterscheidung der Tonhöhen dienen.

In den früheren Ausgaben dieses Buches hatte ich die Vermutung ausgesprochen, daß die zur Resonanz anscheinend wenig geeigneten Hörhärchen der Ampullen und die den Otolithen gegenüberliegenden der Säckchen bei der Wahrnehmung der Geräusche vorzugsweise beteiligt sein möchten.

Was die Härchen in den Ampullen betrifft, die der vorgelagerter Otolithen ermangeln, so ist es durch die Untersuchungen von Goltz äußerst wahrscheinlich geworden, daß sie, so wie die Bogengänge, einer ganz anderen Art von Sinnesempfindung dienen, nämlich der Wahrnehmung der drehenden Bewegungen des Kopfes. Drehungen um eine zur Ebene eines der Bogengänge senkrechte Achse werden nicht unmittelbar auf den darin liegenden und vermöge seiner Trägheit zurückbleibenden Wasserring übertragen, und die relative Verschiebung des Wassers gegen die Wandung des Kanales wird an den Nervenhärchen der Ampullen gefühlt werden können. Bei anhaltenderer Drehung wird dagegen auch der Wasserring allmählich durch Reibung an den Wänden des Kanales in Drehung versetzt, und fährt fort sich zu bewegen, wenn die Drehbewegung des Kopfes plötzlich aufhört. Das erregt dann die täuschende Empfindung entgegengesetzter Drehung in Form des bekannten Schwindelgefühls. Verletzungen der Bogengänge ohne Hirnverletzung bringen die auffallendsten Störungen des Gleichgewichtes bei Tieren hervor. Elektrische Durchströmung des Ohres, kühles Wasser in das Ohr gespritzt bei Personen mit durchbohrtem Trommelfell bringen heftiges Schwindelgefühl hervor. Unter diesen Umständen können wir die genannten Teile nicht mehr mit einiger Wahrscheinlichkeit als dem Gehörsinn zugehörig betrachten, um so mehr, als Stöße des Steigbügels gegen das Labyrinthwasser am ovalen Fenster in der Tat wenig geeignet erscheinen, um Strömungen durch die Bogengänge hervorzubringen.

[1]) Pflügers Archiv f. Physiologie 13.

Dagegen stellen die Versuche von Koenig mit klingenden kurzen Stahlstäben und von W. Preyer mit Appunschen Stimmgabeln die Tatsache fest, daß zwischen 4000 und 40000 Schwingungen in der Sekunde hörbare sehr hohe Töne bestehen, für welche die Unterscheidung der Tonhöhe äußerst mangelhaft ist, so daß selbst Unterschiede von einer Quinte oder Oktave in den höchsten Lagen nur zweifelhaft erkannt und von den geübtesten Musikern falsch geschätzt werden. Schon die Terz $c^v - e^v$ (4096 und 5120 Schwingungen) wurde bald als Sekunde, bald als Quarte oder Quinte geschätzt; in noch größerer Höhe wurden Oktaven und Quinten verwechselt.

Wenn wir die Hypothese festhalten, daß jede Nervenfaser des Ohres in ihrer besonderen Tonhöhe empfindet, so würde dies darauf schließen lassen, daß die schwingenden Teile des Ohres, die diese Empfindungen der höchsten Töne auf die Nerven übertragen, viel weniger in ihrer Resonanz begrenzt sind, als die tieferen, d. h. also ihre einmal erregte Bewegung verhältnismäßig schnell verlieren, aber auch verhältnismäßig um so leichter in die zur Empfindung nötige Bewegung zu versetzen sind. Letztere Annahme muß gemacht werden, weil für solche stark gedämpfte Teile die Möglichkeit der Addition vieler einzelner Anstöße sehr beschränkt wird, und es scheint mir dafür die Konstruktion der Hörhärchen in den Otolithensäcken geeigneter zu sein, als die der kürzesten Fasern in der Membrana basilaris. Wenn diese Hypothese sich bestätigt, würden wir die Hörhärchen als die Vermittler der quiekenden, zischenden, schrillenden, knipsenden Hörempfindungen anzusehen haben, und die Art ihrer Reaktion könnte nur gradweise von der der Schneckenfasern unterschieden sein.

ZWEITE ABTEILUNG

DIE

STÖRUNGEN DES ZUSAMMENKLANGES

KOMBINATIONSTÖNE UND SCHWEBUNGEN, KONSONANZ UND DISSONANZ

Siebenter Abschnitt.

Die Kombinationstöne.

In der ersten Abteilung dieses Buches ist das Gesetz ausgesprochen und fortdauernd angewendet worden, daß die schwingenden Bewegungen der Luft und anderer elastischer Körper, welche durch mehrere gleichzeitig wirkende Tonquellen hervorgebracht werden, immer die genaue Summe der einzelnen Bewegungen sind, welche die einzelnen Tonquellen hervorbringen. Dieses Gesetz ist von außerordentlicher Wichtigkeit für die Akustik, weil es die Betrachtung zusammengesetzter Fälle ganz auf die der einfachen zurückführt; aber es ist zu beachten, daß es in voller Strenge nur gilt, wo die Schwingungen an allen Stellen des Luftraumes und der tönenden elastischen Körper von unendlich kleiner Größe sind, wo also die Dichtigkeitsänderungen der elastischen Körper so klein sind, daß sie, verglichen mit der ganzen Dichtigkeit derselben Körper, nicht in Betracht kommen, und ebenso die Verschiebungen der schwingenden Teilchen verschwindend klein sind, verglichen mit den Dimensionen der ganzen elastischen Massen. Nun sind allerdings in den praktischen Anwendungen dieses Gesetzes auf tönende Körper die Schwingungen fast immer sehr klein, und dem unendlich kleinen nahe genug, daß jenes Gesetz mit sehr großer Annäherung auch für die wirklichen Schallschwingungen der musikalischen Töne richtig bleibt, und bei weitem der größte Teil der Erscheinungen aus jenem Gesetz mit der Beobachtung übereinstimmend gefolgert werden kann. Indessen gibt es doch gewisse Erscheinungen, die davon herrühren, daß jenes Gesetz für die zwar sehr kleinen, aber doch nicht unendlich kleinen Schwingungen elastischer Körper nicht ganz genau zutrifft[1]). Eine dieser Erscheinungen, die uns hier interessiert, sind die

[1]) Helmholtz, Über Kombinationstöne in Pogg. Ann. 99, 497. — Monatsberichte der Berliner Akademie, 22. Mai 1856. Daraus ein Auszug in Beilage XII. (Wiss. Abh. 1, 263.)

Kombinationstöne, zuerst entdeckt 1740 von Sorge[1]), einem deutschen Organisten, später allgemeiner bekannt geworden, aber zum Teil mit irrigen Angaben über ihre Höhe, durch den italienischen Violinisten Tartini, nach welchem sie auch oft Tartinische Töne genannt werden.

Man hört diese Kombinationstöne, wenn zwei musikalische Töne von verschiedener Höhe gleichzeitig kräftig und gleichmäßig anhaltend angegeben werden. Die Höhe der Kombinationstöne ist im allgemeinen verschieden sowohl von der der primären Töne, als auch von der ihrer harmonischen Obertöne. Bei Versuchen unterscheidet man sie daher von den letzteren einfach dadurch, daß die Kombinationstöne fehlen, wenn einer der primären Töne allein angegeben wird, und jene erst auftreten, wenn beide primären Töne gleichzeitig angegeben werden. Die Kombinationstöne zerfallen in zwei Klassen. Die erste, von Sorge und Tartini entdeckte Klasse, welche ich Differenztöne genannt habe, ist dadurch charakterisiert, daß ihre Schwingungszahlen gleich sind den Differenzen zwischen den Schwingungszahlen der primären Töne. Die zweite Klasse, die Summationstöne, sind von mir entdeckt; ihre Schwingungszahlen sind gleich der Summe der Schwingungszahlen der primären Töne.

Sucht man die Kombinationstöne von zwei zusammengesetzten Klängen auf, so können sowohl deren Grundtöne als deren Obertöne miteinander sowohl Summationstöne als Differenztöne geben. Die Zahl der vorhandenen Kombinationstöne ist in solchem Falle also sehr groß. Doch ist zu bemerken, daß im allgemeinen die Differenztöne stärker sind als die Summationstöne, und daß die stärkeren primären Töne auch die stärkeren Kombinationstöne geben. Ja die Kombinationstöne wachsen sogar in einem viel stärkeren Verhältnis als die primären Töne, und nehmen auch schneller ab als diese. Da nun in musikalischen Klängen der Grundton meist an Stärke die Obertöne überwiegt, so sind es hauptsächlich die Kombinationstöne der beiden Grundtöne, und zwar deren Differenztöne, welche stärker als alle anderen in das Ohr fallen, und welche deshalb auch zuerst gefunden worden sind. Am leichtesten sind sie zu hören, wenn die beiden primären Töne um weniger als eine Oktave voneinander abstehen;

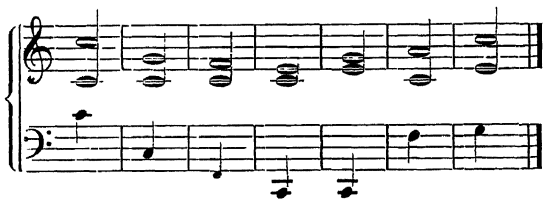
[1]) Vorgemach musikalischer Komposition.

dann ist der Differenzton der Grundtöne tiefer als beide primären Töne. Um ihn zuerst zu hören, wähle man zwei Klänge, welche stark und anhaltend hervorgebracht werden können und ein rein gestimmtes harmonisches Intervall bilden, das enger als eine Oktave ist. Man lasse erst den tieferen von beiden angeben, dann auch den höheren. Bei gehöriger Aufmerksamkeit wird man bemerken, daß in dem Augenblick, wo die höhere Note hinzukommt, auch ein schwacher tieferer Ton hörbar wird, der eben der gesuchte Kombinationston ist. Bei einzelnen Instrumenten, z. B. dem Harmonium, kann man die Kombinationstöne auch durch passend abgestimmte Resonanzkugeln hörbarer machen. Hier sind sie schon in dem Luftraum des Instrumentes erzeugt. In anderen Fällen aber, wo sie nur im Ohr erzeugt werden, helfen die Resonanzkugeln wenig oder nichts.

Folgende Tafel gibt die ersten Differenztöne der gewöhnlichen harmonischen Intervalle:

Intervalle	Schwingungsverhältnis	Differenz	Kombinationston ist tiefer als der tiefere primäre Ton um
Oktave	1 : 2	1	Einklang
Quinte	2 : 3	1	Oktave
Quarte	3 : 4	1	Duodezime
Große Terz	4 : 5	1	2 Oktaven
Kleine Terz	5 : 6	1	2 Oktaven u. große Terz
Große Sexte	3 : 5	2	Quinte
Kleine Sexte	5 : 8	3	Große Sexte

oder in Notenschrift, wobei die primären Töne durch halbe Noten, die Kombinationstöne durch Viertel angegeben sind:



Nachdem man sich geübt hat, die Kombinationstöne reiner Intervalle und gehaltener Töne zu hören, lernt man sie auch bei disharmonischen Intervallen und bei den schnell verhallenden Tönen des

Klaviers erkennen. Die der disharmonischen Intervalle werden dadurch schwer erkennbar, daß sie in stärkeren oder schwächeren Schwebungen begriffen sind, wovon wir den Grund später erörtern werden. Die der schnell verhallenden Töne, wie die des Klaviers, sind eben nur im ersten Augenblick stark genug, um deutlich gehört zu werden, und verhallen selbst schneller als die primären Töne. Auch sind sie im allgemeinen bei den einfachen Tönen der Stimmgabeln und der gedackten Orgelpfeifen leichter zu hören, als bei zusammengesetzten Klängen, wo schon eine Menge anderer Nebentöne vorhanden ist. Letztere geben, wie schon erwähnt ist, auch noch eine Anzahl von Differenztönen der harmonischen Obertöne, die leicht die Aufmerksamkeit von dem Differenzton der Grundtöne ablenken. Dergleichen Kombinationstöne der Obertöne hört man namentlich bei der Violine und am Harmonium häufig.

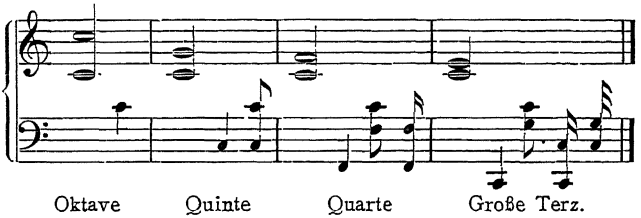
Beispiel: Man nehme die große Terz c' e', Zahlenverhältnis 4 : 5. Der erste Differenzton ist 1, d. h. C. Der erste harmonische Oberton von c' ist c'' mit der Schwingungszahl 8. Dieser gibt mit e' die Differenz 3, d. h. g. Der erste Oberton von e' ist e'' mit der Schwingungszahl 10, dieser gibt mit c' oder 4 die Differenz 6, d. h. g'. Dann geben c'' und e'' den Kombinationston 2, d. h. c. So erhalten wir also durch die ersten Obertöne schon die Reihe der Kombinationstöne 1, 3, 6, 2, oder C, g, g', c. Von diesen ist namentlich der Ton 3 oft leicht wahrzunehmen.

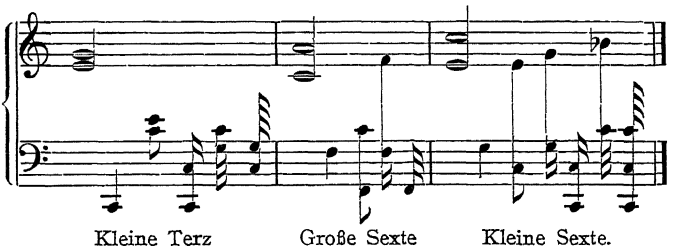
Diese mehrfachen Kombinationstöne sind gewöhnlich nur dann deutlich hörbar, wenn die primären Klänge deutlich hörbare harmonische Obertöne enthalten. Doch kann man nicht behaupten, daß erstere ganz fehlten, wo die letzteren fehlen; nur sind sie dann so schwach, daß das Ohr sie nicht leicht neben den starken primären Tönen und dem ersten Differenzton erkennt. Einmal läßt die Theorie schließen, daß sie schwach da seien; und die Schwebungen unreiner harmonischer Intervalle, von denen später zu sprechen ist, geben ebenfalls ihr Dasein zu erkennen. Man kann in diesen Fällen mit Hallstroem[1]) die Entstehung der mehrfachen Kombinationstöne so darstellen, als wenn der erste Differenzton Kombinationston erster Ordnung, mit den primären Tönen selbst wieder Differenztöne gibt, Kombinationstöne zweiter Ordnung, diese wieder neue mit den primären Tönen und den Tönen erster Ordnung usf.

[1]) Pogg. Ann. **24**, 438, 1832.

Beispiel: Setzen wir wieder voraus, daß zwei einfache Töne im Verhältnis 4 . 5, nämlich *c'* und *e'* zusammenklingen, so ist der Differenzton erster Ordnung 1 oder *C*. Dieser gibt mit den primären Tönen 4 und 5 die Differenztöne zweiter Ordnung 3 und 4, *g* und ein zweites *c'*. Der neue Ton 3 gibt mit den primären Tönen 4 und 5 die Töne dritter Ordnung 1 und 2, *C* und *c*, mit dem Ton erster Ordnung 1 den Ton vierter Ordnung 2, nämlich ein zweites *c* usw. Die Töne verschiedener Ordnung, welche in diesem Beispiel unter Voraussetzung absolut reiner Stimmung zusammenfallen, tun es nicht mehr vollständig, wenn die Stimmung des primären Intervalles nicht absolut rein ist; dann entstehen Schwebungen, wie sie durch die Anwesenheit dieser Töne gefordert werden. Davon später mehr.

Hier folgen die Systeme der Differenztöne verschiedener Ordnungen für verschiedene Intervalle. Die primären Töne sind in halben Noten, die Kombinationstöne erster Ordnung in Vierteln, die zweiter Ordnung in Achteln usw. geschrieben. Dieselben Töne entstehen bei zusammengesetzten Klängen auch als Kombinationstöne der Obertöne.

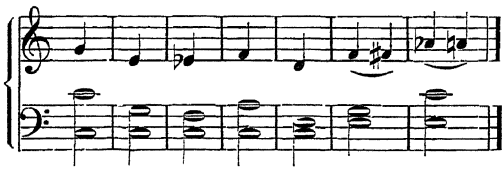




Die Reihen sind abgebrochen, sobald die letzte Ordnung keine neuen Töne mehr liefert. Im allgemeinen ergibt diese Übersicht, daß sich immer die Reihe der harmonischen Töne 1, 2, 3, 4, 5 usw. bis zu den primären Tönen hinauf vollständig herstellt.

Die zweite Art der Kombinationstöne, welche ich Summationstöne genannt habe, ist im allgemeinen von viel geringerer Tonstärke als die Differenztöne, und nur bei besonders günstigen Gelegenheiten, namentlich am Harmonium und an der mehrstimmigen Sirene, leichter

zu hören. Es kommen fast nur die ersten derselben zur Wahrnehmung, deren Schwingungszahl gleich der Summe der Schwingungszahlen der primären Töne ist. Es können natürlich auch Summationstöne der harmonischen Obertöne existieren. Da ihre Schwingungszahl immer gleich der Summe der Schwingungszahlen der primären Töne ist, so sind sie stets höher als diese. Für die einfachen Intervalle ergeben sie sich aus folgender Übersicht:



Bei den letzten beiden Intervallen liegen die Summationstöne zwischen den beiden oben angegebenen Tönen. In musikalischer Beziehung will ich hier gleich darauf aufmerksam machen, daß viele dieser Summationstöne sehr unharmonische Intervalle mit den primären Tönen bilden. Wären sie nicht an den meisten Instrumenten sehr schwach, so würden sie äußerst störende Dissonanzen geben. In der Tat klingen auch die große und kleine Terz und die kleine Sexte auf der mehrstimmigen Sirene, wo alle Kombinationstöne auffallend stark hervortreten, sehr schlecht, während die Oktave, Quinte und große Sexte sehr schön klingen; auch die Quarte macht auf der Sirene nur den Eindruck eines mäßig gut klingenden Septimenakkordes.

Man hat die Kombinationstöne früher für rein subjektiv gehalten und geglaubt, sie entständen erst im Ohr selbst. Man kannte nur die Differenztöne und stellte diese mit den Schwebungen zusammen, welche je zwei zusammenklingende Töne von wenig verschiedener Tonhöhe zu geben pflegen, eine Erscheinung, die wir in den nächsten Abschnitten noch näher untersuchen werden. Man glaubte, wenn solche Schwebungen schnell genug wären, könnten die einzelnen Schwellungen der Tonstärke, gerade so wie es ebensoviel gewöhnliche einfache Luftstöße tun würden, die Empfindung eines neuen Tones hervorbringen, dessen Schwingungszahl der Zahl der Schwebungen gleich sei. Diese Ansicht erklärt aber erstens nicht die Entstehung der Summationstöne, sondern nur die der Differenztöne; zweitens läßt sich nachweisen, daß unter Umständen die Kombinationstöne

objektiv existieren, unabhängig vom Ohr, welches die Schwebungen zu einem neuen Ton zusammen addieren soll; und drittens läßt sich diese Ansicht nicht mit dem durch alle übrigen Erfahrungen bestätigten Gesetz vereinigen, daß das Ohr nur diejenigen Töne empfindet, welche einfachen pendelartigen Bewegungen der Luft entsprechen.

Es läßt sich in der Tat ein anderer Grund für die Entstehung der Kombinationstöne nachweisen, der schon oben im allgemeinen bezeichnet ist. Wenn nämlich irgendwo die Schwingungen der Luft oder eines anderen elastischen Körpers, der von beiden primären Tönen gleichzeitig in Bewegung gesetzt wird, so heftig werden, daß die Schwingungen nicht mehr als unendlich klein betrachtet werden können, da müssen, wie die mathematische Theorie nachweist, solche Schwingungen der Luft entstehen, deren Tonhöhe den Kombinationstönen entspricht.

Einzelne Instrumente liefern besonders starke Kombinationstöne. Die Bedingung für ihre Erzeugung ist, daß dieselbe Luftmasse von beiden Tönen in heftige Erschütterung versetzt wird. Dies geschieht am stärksten in der mehrstimmigen Sirene, in welcher dieselbe rotierende Scheibe zwei oder mehrere Löcherreihen enthält, die aus demselben Windkasten gleichzeitig angeblasen werden [1]). Die Luft des Windkastens ist verdichtet, so oft die Löcher geschlossen sind; wenn sie geöffnet werden, stürzt ein großer Teil derselben in das Freie, es tritt eine beträchtliche Druckverminderung ein. So gerät die Luftmasse im Windkasten und zum Teil selbst im Blasebalg, wie man an diesem leicht fühlen kann, in heftige Schwingungen. Werden zwei Löcherreihen angeblasen, so entstehen Schwingungen in der Luftmasse des Windkastens, die beiden Tönen entsprechen; und durch jede Reihe von Öffnungen wird nicht ein gleichmäßig zufließender Luftstrom entleert, sondern ein Luftstrom, der durch den anderen Ton schon in Schwingungen versetzt ist. Die Kombinationstöne sind unter diesen Umständen außerordentlich stark, fast ebenso stark wie die primären Töne. Daß sie hierbei objektiv in der Luftmasse existieren, kann man durch schwingende Membranen nachweisen, welche mit

[1]) Ein solches Instrument wird im nächsten Abschnitt genauer beschrieben werden.

den Kombinationstönen im Einklang sind. Solche Membranen werden in Mitschwingung versetzt, sobald man beide primäre Töne zugleich angibt, nicht aber, wenn man nur einen oder den anderen primären Ton angibt. Namentlich sind in diesem Falle auch die Summationstöne so stark, daß sie Akkorde, in denen Terzen oder kleine Sexten vorkommen, äußerst widrig machen. Statt der Membranen ist es bequemer, die Resonatoren zu gebrauchen, welche ich oben für die Untersuchung der harmonischen Obertöne empfohlen habe. Auch diese können nur einen Ton verstärken, dessen entsprechende pendelartige Schwingung im Luftraum vorhanden ist, und nicht einen Ton, der nur in der Empfindung des Ohres existiert; man kann sie deshalb gebrauchen, um zu ermitteln, ob ein Kombinationston objektiv vorhanden ist. Sie sind sehr viel empfindlicher als die Membranen und geeignet, auch sehr schwache objektive Töne deutlich erkennen zu lassen.

Ähnlich wie bei der Sirene sind die Verhältnisse im Harmonium. Auch hier ist ein gemeinsamer Windraum vorhanden, und wenn zwei Tasten angeschlagen werden, haben wir zwei Öffnungen, welche durch die Zungen rhythmisch geöffnet und geschlossen werden. Auch hier wird die Luft in dem gemeinsamen Behälter durch beide Töne stark erschüttert, und durch jede Öffnung Luft geblasen, die von der anderen Zunge her schon in schwingende Bewegung gesetzt ist. Es sind deshalb auch bei diesem Instrument die Kombinationstöne objektiv vorhanden und verhältnismäßig sehr deutlich, aber sie sind lange nicht so stark, wie in der Sirene, wohl weil der Windkasten im Verhältnis zu den Öffnungen außerordentlich viel größer ist, deshalb während der kurzen Eröffnung eines Windloches durch die schwingende Zunge nicht so viel Luft herausstürzen kann, um den Druck erheblich zu vermindern. Auch am Harmonium hört man die Kombinationstöne durch gleichgestimmte Resonatoren sehr deutlich verstärkt, namentlich den ersten und zweiten Differenzton und den ersten Summationston. Indessen habe ich mich durch besondere Versuche überzeugt, daß auch bei dem genannten Instrument der größere Teil der Stärke des Kombinationstones erst im Ohr entsteht. Ich habe die Windleitungen in dem Instrument so eingerichtet, daß ein Ton von den unteren mit dem Fuße getretenen Bälgen aus mit Luft versehen wurde, ein zweiter von dem vorher vollgepumpten und durch Ausziehen des sogenannten

Expressionszuges nachher abgeschlossenen Reservebalg, und fand die Kombinationstöne nicht eben viel schwächer als bei der gewöhnlichen Anordnung. Wohl aber war der objektive Teil derselben, welcher durch die Resonatoren verstärkt werden kann, viel schwächer. Man wird nach der oben gegebenen Übersicht der Kombinationstöne leicht die Tasten finden können, welche man anschlagen muß, um einen Kombinationston hervorzubringen, der durch eine gegebene Resonanzröhre verstärkt wird.

Wenn dagegen die Erregungsstellen der beiden Töne ganz voneinander getrennt sind und keinen mechanischen Zusammenhang haben, wenn also z. B. zwei Singstimmen oder zwei einzelne Blasinstrumente oder zwei Violinen den Ton angeben, ist die Verstärkung der Kombinationstöne durch die Resonanzröhren schwach und zweifelhaft. Hier ist also im Luftraum eine dem Kombinationston entsprechende pendelartige Schwingung nicht deutlich wahrnehmbar, und wir müssen schließen, daß die Kombinationstöne, die zuweilen recht kräftig sind, wirklich erst im Ohr entstehen. Aber nach der Analogie der früheren Fälle dürfen wir auch hierbei wohl annehmen, daß es zunächst die äußeren schwingenden Teile des Ohres, namentlich das Trommelfell und die Gehörknöchelchen sind, in denen die Schwingungen hinreichend kräftig zusammenwirken, um Kombinationstöne zu erzeugen, so daß also die den Kombinationstönen entsprechenden Schwingungen in diesen Teilen des Ohres wirklich objektiv bestehen mögen, ohne daß sie im Luftraum objektiv vorkommen. Eine kleine Verstärkung des Kombinationstones durch den entsprechenden Resonator kann daher wohl auch in diesem Falle dadurch entstehen, daß das Trommelfell solche Schwingungen, die dem Kombinationston entsprechen, an die Luftmasse des Resonators abgibt.

In der Tat sind nun auch in der Konstruktion der äußeren schalleitenden Teile des Ohres gewisse Verhältnisse vorhanden, welche besonders günstig für die Erzeugung von Kombinationstönen erscheinen. Einmal kommt der unsymmetrische Bau des Trommelfelles in Betracht. Die nach außen konvexen Radialfasern desselben werden eine stärkere Spannungsänderung erleiden, wenn sie eine Schwingung von mäßiger Amplitude nach innen machen, als wenn die Schwingung nach außen geht. Zu dem Ende braucht die Amplitude der Schwingung nur einen nicht allzu kleinen Bruchteil der geringen Wölbungstiefe des

Bogens dieser Radialfasern auszumachen. Unter diesen Umständen entstehen Abweichungen von der einfachen Superposition der Schwingungen schon bei viel kleineren Amplituden, als dieses der Fall ist, wenn der schwingende Körper nach beiden Seiten hin symmetrisch gebaut ist[1]).

Noch wichtiger erscheint mir aber, namentlich bei starken Tönen, die lose Beschaffenheit des Hammer-Amboßgelenkes zu sein. Wird der Hammerstiel mit dem Trommelfell einwärts getrieben, so muß der Amboß und Steigbügel dieser Bewegung unbedingt folgen, nicht aber, wenn darauf die Auswärtsbewegung des Hammerstieles folgt, wobei die Sperrzähne der beiden Knochen voneinander loslassen können. Dann können die Knochen aneinander klirren. Solches Klirren meine ich in meinem eigenen Ohr immer zu hören, so oft ein sehr starker, namentlich tiefer Ton meinem Ohr zugeleitet wird, auch wenn dies z. B. der Ton einer zwischen den Fingern gehaltenen Stimmgabel ist, an der sich unbedingt nichts Klirrendes befindet.

Dieses eigentümliche Gefühl mechanischen Schwirrens im Ohr ist mir schon längst auffallend gewesen, wenn zwei starke und reine Sopranstimmen Terzengänge ausführen, wobei dann der Kombinationston sehr deutlich herauskommt. Stellen sich die Phasen der beiden Töne so zueinander, daß nach jeder vierten Oszillation des tieferen, nach jeder fünften des höheren eine starke Auswärtsschwingung des Trommelfelles erfolgt, stark genug, um ein momentanes Loslassen im Hammer-Amboßgelenk zu verursachen, so wird sich dadurch eine Reihe von Stößen zwischen den beiden Knochen erzeugen, welche bei fester Verbindung und regelmäßiger Schwingung fehlen würden, und welche zusammengenommen gerade den ersten Differenzton jenes Terzenintervalles erzeugen würden. Ähnlich bei anderen Intervallen.

Zu bemerken ist übrigens, daß dieselben Umstände in der Konstruktion eines schwingenden Körpers, welche ihn geeignet machen, Kombinationstöne hören zu lassen, wenn er von zwei verschieden hohen Tonwellenzügen erregt wird, auch bewirken müssen, daß ein einzelner

[1]) Siehe meinen oben zitierten Aufsatz über Kombinationstöne und Beilage XII. Bei asymmetrisch gebauten schwingenden Körpern sind die Störungen der ersten Potenz der Amplitude proportional, bei symmetrisch gebauten erst der zweiten Potenz dieser immerhin kleinen Größe.

einfacher Ton in ihm Schwingungen erregen muß, die seinen harmonischen Obertönen entsprechen, gleichsam als wenn dieser Ton dann mit sich selbst Summationstöne bildete.

Eine einfachen pendelartigen Schwingungen entsprechende einfach periodische Kraft erregt nämlich nur dann und so lange einfache Sinusschwingungen in einem elastischen Körper, auf den sie wirkt, als die durch die Abweichungen des erregten Körpers von seiner Gleichgewichtslage wachgerufenen elastischen Kräfte diesen Abweichungen selbst proportional bleiben, was bei verschwindend kleiner Größe derselben immer der Fall ist. Werden die Amplituden der Schwingungen so groß, daß merkliche Abweichungen von dieser Proportionalität eintreten, so treten zu den Schwingungen des erregenden Tones noch solche hinzu, welche seinen harmonischen Obertönen entsprechen. Daß solche harmonische Obertöne bei starker Erregung von Stimmgabeln zuweilen vorkommen, habe ich S. 94 angeführt. Ich habe neuerdings diese Versuche mit sehr tiefen Gabeln wiederholt. Bei einer solchen von 64 Schwingungen konnte ich mit geeigneten Resonatoren die Obertöne bis zum fünften hören, wenn sie stark angeschlagen war, wobei sie Schwingungen machte, deren Amplitude fast einen Zentimeter betrug. Bei so großer Breite der Schwingungen eines scharfkantigen Körpers, wie es die Gabelzinken sind, müssen in der umgebenden Luft Wirbelbewegungen entstehen, die erheblich von dem Gesetz der einfachen Schwingungen abweichen. Dagegen schwinden diese Obertöne beim Austönen der Gabel lange vor dem doch auch nur sehr schwach hörbaren tiefen Grundton derselben, entsprechend der von uns gemachten Voraussetzung, daß sie auf Störungen beruhen, die von der Größe der Amplitude abhängen.

Herr R. König[1]) hat mit einer Reihenfolge stimmbarer Gabeln, die mit entsprechenden gut resonierenden Kästen versehen waren und sehr mächtige Töne gaben, die Schwebungen und Kombinationstöne untersucht und dabei gefunden, daß diejenigen unter den letzteren am stärksten hervortreten, welche der Differenz des einen Tones mit dem nächstgelegenen Oberton des nächsten entsprechen, wobei zum Teil sich die Obertöne bis zum achten hinauf (wenigstens in der Zahl der Schwebungen) geltend machten. Er hat leider nicht ange-

[1]) Pogg. Ann. 97, 177—236, 1856.

geben, wie weit er die entsprechenden Obertöne durch Resonatoren einzeln erkennen konnte.

Da das menschliche Ohr leicht Kombinationstöne gibt, wofür wir die in seiner Konstruktion liegenden ursächlichen Momente oben angegeben haben, so muß es auch bei starken einfachen Tönen Obertöne bilden, wie es die Stimmgabeln und die von den Stimmgabeln erregten Luftmassen bei den beschriebenen Beobachtungen tun, und wir werden deshalb nicht leicht die Empfindung eines starken einfachen Tones haben können, ohne auch die Empfindung seiner harmonischen Obertöne dabei zu haben.

Welche wichtige Rolle die Kombinationstöne bei der Akkordbildung spielen, wird sich später ergeben. Ehe wir dazu übergehen können, müssen wir ein zweites Phänomen des Zusammenklanges zweier Töne untersuchen, nämlich die Schwebungen.

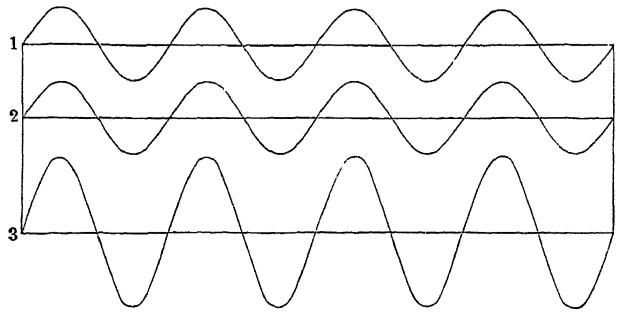
Achter Abschnitt.

Von den Schwebungen einfacher Töne.

Wir gehen jetzt über zu anderen Vorgängen beim Zusammenklang zweier Töne, wobei allerdings die Bewegungen der Luft und der übrigen mitwirkenden elastischen Körper außerhalb und innerhalb des Ohres durchaus aufgefaßt werden können als ein ungestörtes Nebeneinanderbestehen der beiden Schwingungssysteme, welche den beiden Tönen entsprechen, wo aber die Empfindung im Ohr nicht mehr der Summe der beiden Empfindungen entspricht, welche von beiden Tönen einzeln erregt werden. Dadurch unterscheiden sich die Kombinationstöne wesentlich von den nun zu betrachtenden Schwebungen. Bei den Kombinationstönen erleidet die Addition der Schwingungen in den schwingenden elastischen Körpern entweder außerhalb oder innerhalb des Ohres Störungen, während das Ohr die ihm schließlich zugeleitete Bewegung nach dem gewöhnlichen Gesetz in einfache Töne zerlegt. Bei den Schwebungen folgen im Gegenteil die objektiven Bewegungen der elastischen Körper dem einfachen Gesetz; aber die Addition der Empfindungen findet nicht ungestört statt. Solange mehrere Töne in das Ohr fallen, deren Tonhöhen hinreichend verschieden voneinander sind, können die Empfindungen derselben im Ohr ganz ungestört nebeneinander bestehen, weil dadurch wahrscheinlich ganz verschiedene Nervenfasern affiziert werden. Aber Töne von gleicher oder nahe gleicher Höhe, welche dieselben Nervenfasern affizieren, geben nicht einfach die Summe der Empfindungen, die jeder einzelne für sich geben würde, sondern es treten hier neue und eigentümliche Erscheinungen ein, die wir mit dem Namen der Interferenz belegen, wenn sie durch zwei gleiche Töne, mit dem Namen der Schwebungen, wenn sie durch zwei nahe gleiche Töne hervorgebracht werden.

Wir wollen zuerst die Erscheinungen der Interferenz beschreiben. Man denke sich irgend einen Punkt in der Luft oder im Ohr durch eine Tonquelle in Bewegung gesetzt und die Bewegung dargestellt durch die Kurve 1, Fig. 53. Die Bewegung, welche die zweite Tonquelle hervorbringt, sei in den gleichen Zeitpunkten genau dieselbe, dargestellt durch 2, so daß die Berge von 2 auf die Berge von 1, die Täler auf die Täler fallen. Wirken beide gleichzeitig, so wird die Gesamtbewegung die Summe beider sein, dargestellt durch die Kurve 3 von ähnlicher Art, aber mit doppelt so hohen Bergen und doppelt so tiefen Tälern, als jede der beiden ersten. Da die Intensität des Schalles dem Quadrat der Schwingungsweite proportional zu setzen

Fig. 53.

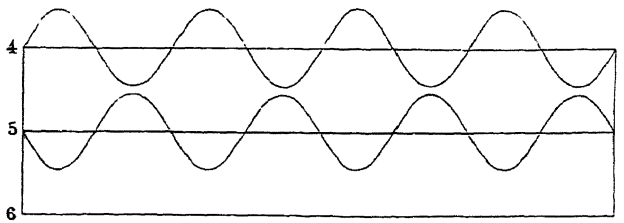


ist, so erhalten wir dabei einen Ton nicht von der doppelten, sondern von der vierfachen Intensität.

Jetzt denke man die Schwingungen der zweiten Tonquelle um eine halbe Schwingungsdauer verschoben, so werden die zu addierenden Schwingungen wie die Kurven 4 und 5, Fig. 54, untereinander stehen, und wenn wir sie addieren, so sind die Höhen der zweiten Kurve immer gleich groß denen der ersten, aber negativ genommen; beide werden sich also gegenseitig aufheben, und ihre Summe wird Null sein, dargestellt durch die gerade Linie 6. Hier addieren sich die Berge von 4 zu den Tälern von 5, und umgekehrt; indem die Berge die Täler ausfüllen, zerstören sie sich gegenseitig. Die Intensität des Schalles wird also Null werden, und wenn eine solche Aufhebung der Bewegungen innerhalb des Ohres geschieht, so hört auch die Empfindung auf. Während jede einzelne Tonquelle für sich wirkend in unserem Ohr die gleiche Empfindung hervorruft, geben

beide zusammenwirkend gar keine Empfindung. Schall hebt den scheinbar gleichen Schall in diesem Fall vollständig auf. Dies erscheint der gewöhnlichen Anschauung außerordentlich paradox, weil sich das natürliche Bewußtsein unter Schall nicht die Bewegung der Luftteilchen denkt, sondern etwas Reelles, der Empfindung des Schalles Analoges. Da nun die Empfindung eines Tones von gleicher Tonhöhe nicht Gegensätze von positiv und negativ zeigt, so erscheint es natürlich unmöglich, daß eine positive Empfindung die andere aufheben soll. Was sich aber gegenseitig aufhebt, sind in einem solchen Falle die Bewegungsanstöße, welche beide Tonquellen auf das Ohr ausüben. Wenn diese so geschehen, daß die Bewegungsanstöße der einen Tonquelle fortdauernd mit entgegengesetzten von der anderen Tonquelle zusammentreffen und sich vollständig im

Fig. 54.



Gleichgewicht halten, so kann eben im Ohr keine Bewegung entstehen und der Gehörnerv nichts empfinden.

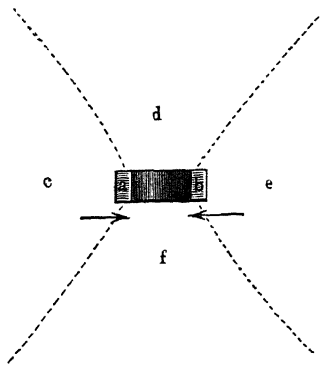
Ich will hier einige Beispiele solcher Fälle anführen, wo Schall den Schall aufhebt.

1. Man setze zwei ganz gleich gebaute gedackte Orgelpfeifen von gleicher Stimmung auf dieselbe Windlade dicht nebeneinander. Jede einzelne, allein angeblasen, gibt einen kräftigen Ton; wenn man aber beide zugleich anbläst, so paßt sich die Luftbewegung beider Pfeifen so einander an, daß, während aus der einen die Luft ausströmt, sie in die andere einströmt, und sie geben deshalb für das Ohr eines entfernteren Beobachters keinen Ton, sondern lassen nur das Sausen der Luft hören. Bringt man aber ein Fäserchen einer Feder nahe den Lippen der Pfeifen, so zeigt dies dieselben Schwingungen, als wenn jede Pfeife allein angeblasen wird. Auch wenn man vom Ohr ein Rohr nach einer der Mündungen leitet, hört man

den Ton dieser Pfeife so viel stärker, daß er durch den der anderen nicht mehr vollständig zerstört werden kann.

Auch jede Stimmgabel zeigt Interferenzerscheinungen, die davon herrühren, daß beide Zinken entgegengesetzte Bewegungen machen. Wenn man eine Stimmgabel anschlägt, dem Ohr nähert und sie dann um ihre Längsachse dreht, so findet man, daß es vier Stellungen der Gabel gibt, in denen man ihren Ton deutlich hört, während er in vier dazwischen liegenden Stellungen unhörbar wird. Die vier Stellungen starken Schalles sind diejenigen, wo entweder eine der beiden Zinken, oder eine der beiden Seitenflächen der Gabel dem Ohr zugekehrt ist. Die Stellen ohne Schall liegen zwischen den genannten nahehin in Ebenen, die unter 45° gegen die Flächen der Zinken durch die Achse der Gabel gehen. Stellt Fig. 55 *a* und *b* die Enden der Gabel von oben gesehen dar, so sind *c*, *d*, *e* und *f* Orte starken Schalles, die punktierten Linien dagegen bezeichnen die Orte der Ruhe. Die Pfeile unter *a* und *b* bezeichnen die gleichzeitige Richtung der Bewegung beider Zinken. Während also die Zinke *a* der benachbarten Luftmasse bei *c* einen Bewegungsanstoß in der Richtung *ca* mitteilt, tut *b* das Entgegengesetzte. Beide Impulse heben sich bei *c* nur zum Teil auf, weil *a* stärker wirkt als *b*. Die punktierten Linien dagegen bezeichnen die Stellen, wo die entgegengesetzten Bewegungsanstöße von *a* und *b* her gleiche Stärke haben und sich daher vollständig aufheben. Bringt man das Ohr nun an eine solche Stelle, wo es nichts hört, und schiebt man entweder über die Zinke *a* oder über *b* ein enges Röhrchen mit der Vorsicht, daß es die schwingende Zinke nicht berührt, so wird der Schall sogleich lauter, indem dadurch der Einfluß der bedeckten Zinke fast ganz beseitigt wird und nun die andere Zinke ungestört allein wirken kann.

Fig. 55.



Sehr bequem für die Demonstration dieser Verhältnisse ist eine Doppelsirene, die ich habe konstruieren lassen [1]). In Fig. 56 ist eine

[1]) Vom Mechanikus Sauerwald in Berlin.

perspektivische Ansicht derselben gegeben. Dieselbe ist aus zwei solchen mehrstimmigen Doveschen Sirenen zusammengesetzt, wie sie schon früher erwähnt sind; a_0 und a_1 sind die beiden Windkästen, c_0 und c_1 die Scheiben, welche auf einer gemeinsamen Achse festsitzen, die bei k eine Schraube trägt, um ein Zählwerk zu treiben, welches eingesetzt werden kann; die Einrichtung eines solchen Zählwerkes ist schon oben beschrieben S. 23. Der obere Kasten a_1 kann selbst um seine Achse gedreht werden. Zu dem Ende ist er mit einem Zahnrad versehen, in welches das kleinere mit einer Kurbel d versehene Zahnrad e eingreift. Die Achse des Kastens a_1, um die er sich dreht, ist eine Verlängerung des oberen Windrohres g_1. Auf jeder der beiden Sirenenscheiben sind vier Löcherreihen, die einzeln oder beliebig verbunden angeblasen werden können; bei i sind die Stifte, welche die Löcherreihen vermittelst einer besonderen Einrichtung [1]) öffnen. Die untere Scheibe hat vier Reihen von 8, 10, 12, 18 Löchern, die obere von 9, 12, 15, 16. Nennen wir also den Ton von acht Löchern c, so hat die untere Scheibe die Töne c, e, g, d_1, die obere d, g, h, c_1. Man kann demnach folgende Tonintervalle hervorbringen:

1. Einklang: $g\,g$ auf beiden Scheiben zugleich.
2. Oktave: $c\,c_1$ und $d\,d_1$ auf beiden.
3. Quinten: $c\,g$ und $g\,d_1$ entweder auf der unteren allein oder auf beiden zusammen.
4. Quarten: $d\,g$ und $g\,c_1$ auf der oberen allein oder beiden Scheiben.
5. Große Terz: $c\,e$ auf der unteren, $g\,h$ auf der oberen, letztere auch auf beiden.
6. Kleine Terz: $e\,g$ auf der unteren oder beiden, $h\,d_1$ auf beiden.
7. Ganzer Ton: $c\,d$ und $c_1\,d_1$ auf beiden.
8. Halber Ton: $h\,c_1$ auf der oberen.

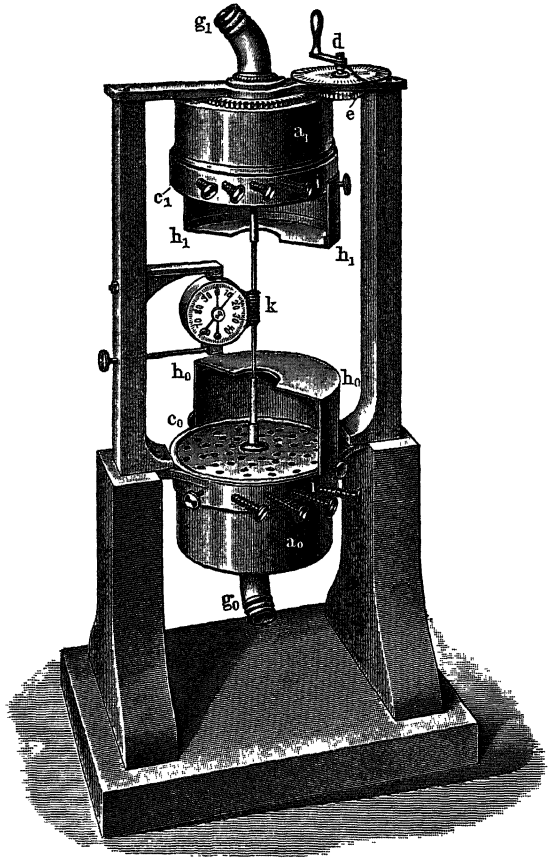
Werden beide Töne auf derselben Scheibe angeblasen, so sind die objektiven Kombinationstöne sehr stark, wie im vorigen Paragraphen schon bemerkt worden ist. Werden sie dagegen auf verschiedenen Scheiben angeblasen, so sind die Kombinationstöne schwach; im letzteren Falle ist es möglich, worauf es uns hier zunächst besonders ankommt, die beiden Töne mit jedem beliebigen Phasen-

[1]) Deren Beschreibung in Beilage XIII.

unterschied zusammenwirken zu lassen. Zu dem Ende hat man nur die Stellung des oberen Kastens zu ändern.

Zunächst haben wir nur die Erscheinungen an dem Einklang *g g* zu untersuchen. Der Erfolg der Interferenz beider Töne wird in diesem Fall dadurch komplizierter, daß die Sirenenklänge nicht ein-

Fig. 56.



fache, sondern zusammengesetzte Töne sind und die Interferenz der einzelnen harmonischen Töne von der des Grundtones und voneinander unabhängig ist. Um die harmonischen Obertöne des Sirenenklanges durch ein Ansatzrohr zu dämpfen, habe ich zylindrische Messingkästen fertigen lassen, von denen man bei $h_1\,h_1$ und $h_0\,h_0$ die hintere Hälfte sieht. Diese Kästen sind in je zwei Hälften zerschnitten, so

daß man sie abnehmen, wieder aufsetzen und dann durch Schrauben auf dem Windkasten befestigen kann. Wenn der Sirenenton sich dem Grundton dieser Kästen nähert, wird der Klang voll, stark und weich, wie ein schöner Hornton, während sonst die Sirene einen ziemlich scharfen Ton hat. Gleichzeitig braucht man wenig Luft, aber starken Druck. Es sind dies ganz dieselben Verhältnisse, wie bei einer Zunge, der man ein Ansatzrohr von ihrer eigenen Tonhöhe gegeben hat. In dieser Weise gebraucht, ist die Sirene namentlich zu den Interferenzversuchen sehr geeignet.

Stehen beide Kästen so, daß die Luftstöße auf beiden Seiten genau gleichzeitig erfolgen, so fallen die gleichen Phasen des Grundtones sowohl wie sämtlicher Obertöne zusammen, sie werden alle verstärkt.

Dreht man die Kurbel um einen halben rechten Winkel, was einer Drehung des Kastens um $^1/_6$ eines rechten Winkels, oder um $^1/_{24}$ der Peripherie, oder um einen halben Abstand der Löcher in der angeblasenen Reihe von 12 Löchern entspricht, so beträgt die Phasendifferenz der beiden Grundtöne $^1/_2$ Schwingungsdauer, die Luftstöße des einen Kastens fallen gerade in die Mitte zwischen die des anderen, und die beiden Grundtöne vernichten sich gegenseitig. Aber die Phasendifferenz ihrer höheren Oktaven beträgt unter denselben Umständen eine ganze Schwingungsdauer, d. h. diese verstärken sich gegenseitig, und so verstärken sich in der gleichen Stellung alle geradzahligen harmonischen Töne, während die ungeradzahligen sich aufheben. In der neuen Stellung wird der Ton also schwächer, weil eine Anzahl seiner Töne fortfällt; aber er hört nicht ganz auf, sondern schlägt vielmehr in seine Oktave um. Dreht man die Kurbel um einen zweiten halben Rechten, so daß die ganze Drehung einen ganzen Rechten beträgt, so fallen die Luftstöße beider Scheiben wieder genau zusammen, die Töne verstärken sich. Bei einer ganzen Umdrehung der Kurbel findet man also vier Stellungen, wo der ganze Klang der Sirene verstärkt erscheint, und vier andere dazwischen, wo der Grundton nebst allen ungeradzahligen harmonischen Tönen verschwindet und dafür schwächer die höhere Oktave mit den geradzahligen Obertönen eintritt. Achtet man auf den nächsten Oberton, die Oktave des Grundtones allein, indem man ihn durch eine passende Resonanzröhre belauscht, so findet man, daß er nach Drehung um

$^1/_4$ Rechten schwindet, nach Drehung um $^1/_2$ Rechten wieder verstärkt wird, also bei einer ganzen Umdrehung der Kurbel achtmal schwindet und achtmal hervorkommt. Der dritte Ton, die Duodezime des Grundtones, schwindet in derselben Zeit zwölfmal, der vierte Ton sechzehnmal usw.

Ähnlich wie bei der Sirene erscheint die Interferenz auch bei anderen zusammengesetzten Klängen, wenn man zwei Klänge derselben Art mit dem Unterschied einer halben Schwingungsdauer zusammenwirken läßt; der Ton erlischt nicht, sondern schlägt in die Oktave um. Wenn man z. B. zwei offene Orgelpfeifen oder zwei Zungenpfeifen von gleichem Bau und gleicher Stimmung nebeneinander auf dieselbe Windlade setzt, so adaptieren sich ihre Schwingungen gewöhnlich ebenfalls so, daß der Luftstrom abwechselnd in die eine und die andere hineintritt; und während der Klang der gedackten Pfeifen, die nur ungerade Töne haben, dann fast ganz erlischt, tritt bei den offenen und Zungenpfeifen die höhere Oktave hervor. Es ist dies der Grund, warum man keine Verstärkung des Tones auf der Orgel oder dem Harmonium durch Kombination gleichartiger Zungen oder gleichartiger Pfeifen erhalten kann.

Bisher haben wir je zwei Töne zusammenkommen lassen, welche genau gleiche Höhe haben; untersuchen wir jetzt, was geschieht, wenn zwei Töne von etwas verschiedener Tonhöhe zusammenkommen. Um Aufschluß über diesen Fall zu geben, ist die oben beschriebene Doppelsirene wieder sehr geeignet. Wir können nämlich die Höhe des oberen Tones ein wenig verändern, wenn wir den Windkasten mittels der Kurbel langsam herumdrehen; und zwar wird der Ton tiefer, wenn der Windkasten in derselben Richtung gedreht wird, wie die Scheibe rotiert, und er wird höher, wenn der Kasten in entgegengesetzter Richtung gedreht wird. Die Schwingungsdauer des Sirenentones ist nämlich gleich der Zeit, welche ein Loch der rotierenden Scheibe gebraucht, um von einem Loch des Windkastens bis vor das nächste zu gelangen. Kommt das Loch des Kastens dem Loch der Scheibe entgegen durch eine Drehung des Kastens, so werden die beiden Löcher eher zusammenstoßen, als wenn der Kasten stillsteht; die Schwingungsdauer wird kürzer, der Ton höher. Das Umgekehrte findet bei der entgegengesetzten Drehung des Kastens statt. Man hört diese Erhöhungen und Vertiefungen des Tones sehr leicht,

wenn man ein wenig schneller dreht. Gibt man nun an beiden rotierenden Scheiben die Töne von zwölf Löchern an, so sind diese in absolut genauem Einklang, solange der obere Kasten der Sirene stillsteht. Die beiden Töne verstärken sich entweder fortdauernd, oder schwächen sich fortdauernd gegenseitig, je nach der Stellung des oberen Kastens. Setzt man aber den oberen Kasten in langsame Rotation, so verändert man dadurch, wie wir eben gesehen haben, die Tonhöhe des oberen Tones, während der untere, dessen Windkasten nicht beweglich ist, unverändert bleibt. Wir bekommen also nun den Zusammenklang zweier etwas verschiedener Töne. Wir hören dann sogenannte Schwebungen der Töne, d. h. die Intensität des Tones wird abwechselnd stark und schwach in regelmäßiger Folge. Der Grund davon wird durch die Einrichtung unserer Sirene leicht erkennbar. Nämlich durch seine Drehung kommt der obere Windkasten abwechselnd in die Stellungen, welche, wie wir vorher gesehen haben, starken und schwachen Ton geben. Wenn die Kurbel um einen rechten Winkel gedreht wird, geht der Windkasten aus einer Stellung starken Tones durch eine solche von schwachem Ton über in die nächste Stellung starken Tones. Dementsprechend finden wir bei jeder ganzen Drehung der Kurbel vier Schwebungen, wie schnell auch die Scheiben laufen mögen, und wie hoch oder tief daher ihr Ton sein mag. Sowie wir den Kasten anhalten zur Zeit eines Maximums der Tonstärke, behalten wir dauernd die große Tonstärke, wenn wir ihn dagegen zur Zeit eines Minimums anhalten, den schwachen Ton.

Die Mechanik des Instrumentes gibt hierbei gleichzeitig Aufschluß über den Zusammenhang zwischen Zahl der Schwebungen und Differenz der Tonhöhe. Eine leichte Überlegung zeigt, daß die Zahl der Luftstöße in der Zeit, wo die Kurbel um einen rechten Winkel gedreht wird, um Eins vermindert wird. Jeder Drehung der Kurbel um einen rechten Winkel entspricht eine Schwebung. Die Zahl der Schwebungen in einer gegebenen Zeit findet sich also gleich der Differenz in der Anzahl der Schwingungen, welche beide Klänge in derselben Zeit ausführen. Dies ist das allgemeine Gesetz, welches die Zahl der Schwebungen bei allen Arten von Klängen bestimmt. Seine Richtigkeit ist aber bei anderen Instrumenten nur durch sehr genaue und mühsame Messungen zu kon-

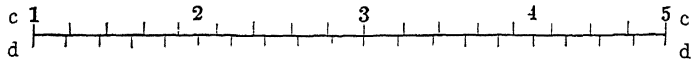
trollieren, während sie bei der Sirene sich aus der Konstruktion des Instrumentes unmittelbar ergibt.

Graphisch dargestellt ist der Vorgang in Fig. 57. Es bezeichne *c c* die Reihe der Luftstöße des einen Tones, *d d* die des anderen. Die Strecke *c c* ist in 18 Teile geteilt, die gleich lange Strecke *d d* in 20. Bei 1, 3, 5 fallen die Luftstöße beider Töne zusammen, wir haben Verstärkung des Tones; bei 2 und 4 fallen sie zwischen einander und schwächen sich gegenseitig. Die Zahl der Schwebungen für die ganze Strecke ist 2, da die Differenz in der Anzahl der Teile, deren jeder eine Schwingung darstellt, gleich 2 ist.

Die Maxima der Tonintensität während der Schwebungen nennt man Schläge; diese sind getrennt durch mehr oder weniger vollständige Pausen.

Schwebungen sind mit allen Tonwerkzeugen leicht hervorzurufen, sobald man zwei wenig voneinander verschiedene Töne angibt. Am

Fig. 57.



schönsten treten sie heraus bei einfachen Tönen von Stimmgabeln oder gedackten Pfeifen, weil hier der Ton in den Pausen wirklich ganz verschwindet. Dabei macht sich auch eine kleine Schwankung der Höhe des schwebenden Tones bemerkbar[1]). Bei den zusammengesetzten Klängen anderer Instrumente treten während der Pausen des Grundtones die Obertöne hervor, und der Ton schlägt deshalb in die Oktave um, wie es schon für die Fälle von Interferenz des Schalles vorher beschrieben ist. Hat man zwei gleich gestimmte Stimmgabeln, so braucht man nur an das Ende der einen etwas Wachs zu kleben, beide anzuschlagen und entweder demselben Ohr zu nähern, oder beide auf die Holzplatte eines Tisches, eines Resonanzbodens usw. zu setzen. Um zwei gleich gestimmte gedackte Pfeifen zum Schlagen zu bringen, braucht man nur dem Munde der einen einen Finger langsam zu nähern, wodurch sie etwas tiefer wird. Die Schwebungen zusammengesetzter Klänge hört man von selbst beim Anschlag jeder Taste eines verstimmten Klaviers, wenn die Stimmung

[1]) Die Erklärung dieser von Herrn G. Guéroult mir mitgeteilten Erscheinung s. in Beilage XIV.

der beiden Saiten, die demselben Ton angehören, nicht mehr ganz dieselbe ist; oder wenn das Klavier gut gestimmt ist, braucht man nur an eine der Saiten, die dem angeschlagenen Ton angehören, ein Wachskügelchen von der Größe einer Erbse anzukleben. Dadurch verstimmt man sie genügend. Bei diesen zusammengesetzten Klängen muß man aber schon etwas mehr aufpassen, weil die Schwächung des Tones nicht so auffallend ist. Die Schwebung erscheint hier mehr wie eine Änderung der Tonhöhe und des Klanges. Sehr auffallend ist das an der Sirene, je nachdem man die Ansatzröhren aufsetzt oder nicht. Bei aufgesetzten Ansatzröhren ist der Grundton verhältnismäßig stark. Bringt man daher durch Drehung der Kurbel Schwebungen hervor, so ist Abnahme und Zunahme der Tonstärke sehr auffallend. Nimmt man aber die Ansatzröhren ab, so erlangen die Obertöne verhältnismäßig große Stärke, und da das Ohr in der Vergleichung der Stärke zweier Töne von verschiedener Höhe sehr unsicher ist, so ist die Veränderung der Tonstärke während der Schwebungen viel weniger auffallend, als die der Tonhöhe oder Klangfarbe.

Achtet man bei schlagenden zusammengesetzten Klängen auf die Obertöne, so hört man auch diese schlagen, und zwar kommen auf jede Schwebung des Grundtones zwei Schwebungen des zweiten Partialtones, drei des dritten usw. Bei starken Obertönen kann man dadurch leicht irre werden, wenn man die Schläge zählen will, namentlich wenn die Schläge des Grundtones sehr langsam sind, so daß ihre Pausen ein oder zwei Sekunden betragen. Man muß dann auf die Tonhöhe der gehörten Schläge wohl achten, nötigenfalls einen Resonator zu Hilfe nehmen.

Man kann Schwebungen dem Auge sichtbar machen, wenn man einen passenden elastischen Körper durch sie in Mitschwingen versetzt. Natürlich können Schwebungen in diesem Falle nur zustande kommen, wenn die beiden erregenden Töne dem Grundton des mitschwingenden Körpers nahe genug liegen, daß derselbe von beiden Tönen in merkliches Mitschwingen versetzt wird. Am leichtesten ist dies mit einer dünnen Saite zu erreichen, die auf einem Resonanzboden ausgespannt ist, auf dem man zwei ihr selbst und untereinander nahe gleich gestimmte Stimmgabeln aufsetzt. Wenn man die Schwingungen der Saite durch ein Mikroskop beobachtet, oder ein Fäserchen einer Gänsefederfahne an sie anklebt, welches ihre Schwingungen in verstärktem Maße mitmacht, so sieht man deutlich, wie die Saite

abwechselnd in großen und kleinen Exkursionen mitschwingt, je nachdem der Ton der beiden Gabeln im Maximum oder Minimum seiner Stärke sich befindet.

Das gleiche läßt sich erreichen beim Mitschwingen einer gespannten Membran. Fig. 58 ist die Kopie einer Zeichnung, welche mittels einer solchen schwingenden Membran, der des Phonautographen der Herren Scott und König zu Paris, ausgeführt ist. Die trommelfellähnliche Membran dieses Instrumentes trägt ein kleines steifes Stielchen, welches auf einem rotierenden Zylinder die Schwingungen der Membran aufzeichnet. Die Membran war in dem hier vorliegenden Fall durch zwei Orgelpfeifen, welche Schwebungen geben, in Bewegung gesetzt. Man sieht an der Wellenlinie, von der hier nur

Fig. 58.



ein kleines Stück dargestellt ist, wie Zeiten starker Schwingung gewechselt haben mit Zeiten, wo fast Ruhe eintrat. Also auch hier sind die Schwebungen von der Membran selbst mitgemacht worden. Ähnliche Zeichnungen endlich sind von Herrn Dr. Politzer ausgeführt worden, indem das schreibende Stielchen direkt an das Gehörknöchelchen (die Columella) einer Ente angesetzt und dann ein schwebender Ton durch zwei Orgelpfeifen hervorgebracht wurde, wodurch also nachgewiesen ist, daß auch die Gehörknöchelchen den Schwebungen zweier Töne nachfolgen [1]).

Überhaupt muß dies immer geschehen, wenn die Tonhöhe der beiden angegebenen Töne voneinander und von dem eigenen Ton des mitschwingenden Körpers so wenig abweicht, daß letzterer durch beide Töne zugleich in merkliches Mitschwingen versetzt werden kann. Mitschwingende Körper von geringer Dämpfung, wie Stimmgabeln, werden also zwei außerordentlich nahe erregende Töne fordern,

[1]) Sehr deutlich lassen sich die Schwebungen zweier Töne auch mittels einer vibrierenden Flamme, wie sie in Beilage II beschrieben ist, sichtbar machen. Die Flamme muß mit einem Resonator verbunden sein, dessen Tonhöhe derjenigen der beiden erregenden Töne hinreichend nahe kommt. Selbst ohne den rotierenden Spiegel zur Betrachtung der Flamme zu gebrauchen, erkennt man die mit den hörbaren Schlägen isochronen Gestaltveränderungen der Flamme.

um sichtbare Schwebungen zeigen zu können, und diese werden deshalb sehr langsam sein müssen; bei stärker gedämpften Körpern, Membranen, Saiten usw., wird die Differenz der erregenden Töne größer sein dürfen, und deshalb werden auch die Schwebungen selbst schneller erfolgen können.

Das gleiche gilt nun auch für die elastischen Endgebilde der Gehörnervenfasern. Ebenso wie wir gesehen haben, daß sichtbare Schwebungen der Gehörknöchelchen eintreten können, werden auch die Cortischen Bögen in Schwebungen geraten müssen, so oft zwei Töne angegeben werden, die einander hinreichend naheliegen, um gleichzeitig dieselben Cortischen Bögen in Mitschwingung zu versetzen. Wenn nun, wie wir früher vorausgesetzt haben, die Intensität der Empfindung in den dazu gehörigen Nervenfasern mit der Intensität der elastischen Schwingungen wächst und abnimmt, so wird die Stärke der Empfindung in demselben Maße zunehmen und abnehmen müssen, wie es die Schwingungen der betreffenden elastischen Anhänge des Nerven tun. Auch in diesem Fall wäre die Bewegung der Cortischen Bögen noch zu betrachten als zusammengesetzt aus denjenigen Bewegungen, welche beide Töne einzeln in ihnen hervorgebracht hätten. Je nachdem diese Bewegungen gleich gerichtet oder entgegengesetzt gerichtet sind, müssen sie sich verstärken oder schwächen, indem sie sich addieren. Erst wenn diese Schwingungen Empfindungen in den Nerven erregen, tritt die Abweichung von dem Gesetz ein, daß je zwei Töne und je zwei Tonempfindungen ungestört nebeneinander bestehen.

Wir kommen nun zu einem Teil dieser Untersuchung, der für die Theorie der musikalischen Konsonanz sehr wichtig ist und leider bisher von den Akustikern sehr wenig berücksichtigt worden ist. Es handelt sich nämlich um die Frage, was aus den Schwebungen wird, wenn man sie schneller und schneller werden läßt, und wieweit ihre Anzahl wachsen darf, ohne daß das Ohr unfähig wird, sie wahrzunehmen. Die meisten Akustiker waren bisher wohl geneigt, sich der Annahme von Thomas Young anzuschließen, daß, wenn die Schwebungen sehr schnell würden, sie allmählich in einen Kombinationston (ersten Differenzton) übergehen sollten. Young stellte sich vor, daß die Tonstöße, welche während der Schwebungen erfolgen, dieselbe Wirkung auf das Ohr haben möchten, wie elementare Luftstöße, der

Sirene zum Beispiel; und wie 30 Luftstöße aus der Sirene, wenn sie während einer Sekunde erfolgen, die Empfindung eines tiefen Tones hervorbringen, so sollten 30 Schwebungen je zweier beliebiger höherer Töne dieselbe Empfindung eines tiefen Tones hervorbringen können. Allerdings paßt zu dieser Ansicht der Umstand gut, daß die Schwingungszahl des ersten und stärksten Kombinationstones in der Tat so groß ist, wie die Zahl der Schwebungen, welche die beiden Töne hervorbringen müßten. Von großer Bedeutung aber ist es hier, daß es andere Kombinationstöne gibt, namentlich die von mir so genannten Summationstöne, welche sich dieser Ansicht durchaus nicht fügen, dagegen leicht abzuleiten sind aus der von mir aufgestellten Theorie der Kombinationstöne. Es ist ferner gegen Youngs Ansicht einzuwenden, daß in vielen Fällen die Kombinationstöne schon außerhalb des Ohres entstehen und passend gestimmte Membranen oder Resonanzkugeln in Mitschwingung versetzen können, was durchaus nicht der Fall sein könnte, wenn die Kombinationstöne nichts wären als die Reihe der Schwebungen mit ungestörter Superposition der beiden Tonwellenzüge. Denn die mechanische Theorie des Mitschwingens läßt erkennen, daß eine Luftbewegung, welche aus zwei einfachen Schwingungen von verschiedener Periode zusammengesetzt ist, auch immer zunächst nur wieder solche Körper in Mitschwingung versetzen kann, deren eigener Ton einem jener beiden angegebenen Töne entspricht, solange nicht solche Bedingungen eintreten, durch welche die einfache Superposition beider Tonwellensysteme gestört wird. Die Art dieser Bedingungen hatten wir im vorigen Abschnitt auseinander gesetzt. Wir dürfen demnach die Kombinationstöne als eine accessorische Erscheinung betrachten, durch welche aber der Ablauf der beiden primären Tonwellensysteme und ihrer Schwebungen nicht wesentlich gestört wird.

Gegen die ältere Meinung können wir uns auf die sinnliche Beobachtung berufen, welche lehrt, daß eine viel größere Anzahl von Schwebungen noch bestimmt gehört werden kann, als 30 in der Sekunde. Um zu diesem Resultat zu gelangen, muß man nur allmählich von langsameren zu schnelleren Schwebungen vorschreiten und dabei beachten, daß die beiden Töne, welche die Schwebungen hervorbringen sollen, nicht zu weit in der Skala auseinander liegen dürfen, weil hörbare Schwebungen nur dann eintreten, wenn die Töne in der Skala einander so nahe sind, daß beide dieselben elastischen

Nervenanhänge in Mitschwingung versetzen können. Man kann aber die Zahl der Schwebungen vermehren, ohne das Intervall beider Töne zu vergrößern, wenn man beide Töne in höheren Oktaven wählt.

Am besten beginnt man die Beobachtungen, indem man zwei einfache Töne von gleicher Höhe, etwa aus der eingestrichenen Oktave, durch Stimmgabeln oder gedackte Orgelpfeifen nebeneinander hervorbringt und langsam die Stimmung des einen verändert. Zu dem Ende braucht man nur an die Enden der einen Stimmgabel nach und nach mehr und mehr Wachs zu kleben; von den Orgelpfeifen kann man die eine langsam tiefer machen, wenn man ihre Mündung mehr und mehr deckt; übrigens sind die meisten gedackten Pfeifen, um ihre Stimmung zu regeln, auch an ihrem verschlossenen Ende mit einem beweglichen Stopfen oder Deckel versehen, den man tiefer hineintreiben kann, wodurch man die Pfeife höher macht, oder herausziehen, wobei sie tiefer wird.

Wenn man in solcher Weise zuerst eine kleine Differenz der Töne hervorbringt, so hört man die Schwebungen wie lang hinziehende Tonwellen abwechselnd fallen und wieder sich heben. Dergleichen langsame Schwebungen machen auf das Ohr durchaus keinen unangenehmen Eindruck; sie können sogar bei der Ausführung einer in langgetragenen Akkorden hinziehenden Musik etwas sehr Feierliches haben, oder auch einen etwas bewegteren, gleichsam zitternden oder erschütternden Ausdruck geben. Daher findet man wohl an neueren Orgeln oder Harmoniums ein Register mit je zwei Zungen oder Pfeifen, welche Schwebungen geben. Man ahmt dadurch das Tremolieren der menschlichen Stimme und der Geigen nach, welches, passend in einzelnen Stellen gebraucht, allerdings sehr ausdrucksvoll und wirksam sein kann, aber freilich eine ebenso abscheuliche Unart ist, wenn es fortdauernd angewendet wird, wie es leider oft genug geschieht.

Diesen langsamen Schwebungen, wenn nicht mehr als vier bis sechs auf die Sekunde kommen, folgt das Ohr leicht. Der Hörer hat Zeit, alle ihre einzelnen Phasen aufzufassen und sich einzeln zum Bewußtsein zu bringen; er kann die Schwebungen ohne Schwierigkeit zählen. Wenn aber die Differenz der beiden Töne wächst, etwa bis zu einem Halbton, so wächst die Zahl der Schwebungen bis 20 oder 30 in der Sekunde, und es ist natürlich dann nicht mehr möglich, ihnen einzeln mit dem Ohr so zu folgen, daß man sie noch zählen könnte.

Aber wenn man anfangs die langsamen Tonstöße gehört hat, sie dann immer schneller und schneller aufeinander folgen hört, so erkennt man doch, daß der sinnliche Eindruck auf das Ohr durchaus derselbe bleibt, nämlich der einer Reihe von getrennten Tonstößen, auch dann, wenn deren Zahl so groß geworden ist, daß man nicht mehr Zeit hat, jeden einzelnen Stoß, während man ihn hört, im Bewußtsein zu fixieren und ihm eine Zahl beizulegen.

Während der Hörer aber in einem solchen Fall noch sehr wohl unterscheiden kann, daß sein Ohr jetzt 30 Tonstöße von derselben Art hört, wie es vorher vier oder sechs in der Sekunde gehört hat, so wird doch der Charakter des Gesamteindruckes eines so schnell schwebenden Klanges ein anderer. Erstens nämlich wird die Tonmasse wirr, was ich mehr auf den psychologischen Eindruck beziehen möchte. Wir hören eben eine Reihe von Tonstößen, können erkennen, daß eine solche da ist, können ihnen aber doch einzeln nicht mehr folgen, sie nicht mehr einzeln voneinander sondern. Außer diesem mehr psychologischen Moment wird aber auch der direkte sinnliche Eindruck unangenehm. Ein solcher schnell schwebender Zusammenklang ist knarrend und rauh. Warum er knarrend erscheint, erklärt sich auch leicht; denn das Eigentümliche knarrender Töne ist, daß sie intermittierend sind. Denken wir an den Buchstaben *R* als charakteristisches Beispiel eines knarrenden Tones. Er wird bekanntlich dadurch hervorgebracht, daß wir entweder das Gaumensegel oder den vorderen dünnen Teil der Zunge dem Luftstrom so in den Weg stellen, daß letzterer nur in einzelnen Stößen sich Bahn brechen kann und deshalb der mit ihm verbundene Stimmton bald frei hervorbricht, bald abgeschnitten wird.

Auch mittels der oben beschriebenen Doppelsirene habe ich intermittierende Töne hervorgebracht, indem ich statt des Windrohres des oberen Kastens eine kleine Zungenpfeife einsetzte und durch diese die Luft eintrieb. Ihr Ton wird nach außen hin nur hörbar, so oft bei der Umdrehung der Scheibe deren Löcher vor die Löcher des Kastens treten und der Luft den Ausweg eröffnen. Wenn man die Scheibe umlaufen läßt, während man Luft durch die Pfeife treibt, so erhält man daher einen intermittierenden Ton, der genau so klingt, wie ein schwebender Zusammenklang, obgleich seine Intermittenzen in rein mechanischer Weise erzeugt sind. Noch in anderer Weise

gelingt es mittels derselben Sirene. Zu dem Ende entferne ich den unteren Windkasten und lasse nur seinen durchlöcherten Deckel stehen, über dem die rotierende Scheibe läuft. Von unten her wird das Ende eines Kautschukrohres an eine der Öffnungen des Deckels angesetzt, dessen anderes Ende mittels eines passenden Röhrchens in das Ohr des Beobachters geleitet ist. Durch die umlaufende Scheibe wird die Öffnung, an welche das Kautschukrohr angesetzt ist, abwechselnd geöffnet und geschlossen. Bringt man in ihre Nähe oberhalb der rotierenden Scheibe eine Stimmgabel oder ein anderes passendes Tonwerkzeug, so hört man den Ton intermittierend, und dadurch, daß man die Scheibe der Sirene schneller oder langsamer umlaufen läßt, kann man die Zahl der Intermissionen beliebig regulieren.

Auf beide Weisen erhält man also intermittierende Töne. Im ersten Fall ist der Ton des Pfeifchens im äußeren Luftraum unterbrochen, weil er nur zeitweise hervorbrechen kann, der intermittierende Ton kann hier von einer beliebigen Anzahl von Hörern vernommen werden. Im zweiten Fall ist der Ton im äußeren Luftraum kontinuierlich, aber gelangt unterbrochen zum Ohr des Beobachters, der durch die Sirenenscheibe hört. Er kann dann allerdings nur von einem Beobachter gehört werden, aber man kann leicht alle Arten von Klängen von der verschiedensten Höhe und Klangfarbe zum Versuch benutzen. Alle bekommen dadurch, daß man sie intermittierend macht, genau dieselbe Art von Rauhigkeit, welche zwei in schnellen Schwebungen zusammenklingende Töne darbieten. Man erkennt auf diese Weise sehr deutlich, wie Schwebungen und Intermittenzen sowohl unter sich gleich sind, als auch beide bei einer gewissen Anzahl die Art des Geräusches hervorbringen, welche wir Knarren nennen.

Schwebungen bringen intermittierende Erregung gewisser Hörnervenfasern hervor. Warum eine solche intermittierende Erregung so viel unangenehmer wirkt, als eine gleich starke oder selbst stärkere kontinuierliche, läßt sich aus der Analogie anderer Nerven des menschlichen Körpers erkennen. Jede kräftige Erregung eines Nerven bringt nämlich zugleich eine Abstumpfung seiner Erregbarkeit hervor, so daß er infolgedessen für neue Einwirkungen von Reizen unempfindlicher wird als vorher. Sobald dagegen die Erregung aufhört und der Nerv sich selbst überlassen wird, so stellt sich im lebenden Körper unter dem Einfluß des arteriellen Blutes die Reizbarkeit bald wieder

her. Ermüdung und Erholung treten, wie es scheint, in verschiedenen Organen des Körpers mit verschiedener Schnelligkeit ein; wir finden sie aber überall, wo Muskeln und Nerven ihre Wirkungen zu äußern haben. Zu den Organen, wo beide verhältnismäßig schnell zustande kommen, gehört das Auge, welches auch sonst die größten Analogien mit dem Ohr darbietet. Wir brauchen nur einen unmerklich kurzen Augenblick nach der Sonne geblickt zu haben, so finden wir schon, daß diejenige Stelle der Nervenhaut oder Netzhaut des Auges, die vom Licht getroffen war, unempfindlicher gegen anderes Licht geworden ist. Wir sehen nämlich unmittelbar danach einen dunkeln Fleck von der Größe des Sonnenkörpers, wenn wir nach einer gleichmäßig hellen Fläche, z. B. dem Himmelsgewölbe, blicken, oder auch mehrere solche Flecke und Linien dazwischen, wenn wir das Auge nicht fest nach dem Sonnenkörper hin gerichtet hatten, sondern mit dem Blick hin und her schwankten. Ein Augenblick genügt, um diese Wirkung hervorzubringen, ja selbst ein elektrischer Funke, der eine unmeßbar kurze Zeit dauert, bringt eine solche Art der Ermüdung hervor.

Wenn wir nun dauernd nach einer hellen Fläche hinsehen mit unermüdetem Auge, so ist im ersten Moment der Eindruck am stärksten, aber gleichzeitig stumpft der Eindruck auch die Empfindlichkeit des Auges ab und wird dadurch immer schwächer und schwächer, je länger wir ihn auf das Auge wirken lassen. Wer aus dem Dunkel in das volle Tageslicht tritt, ist geblendet; nach wenigen Minuten dagegen, wenn die Empfindlichkeit seines Auges abgestumpft ist durch den Lichtreiz oder, wie wir auch sagen, sowie sein Auge an den Lichtreiz gewöhnt ist, findet er diesen Grad von Helligkeit sehr angenehm. Umgekehrt, wer aus vollem Tageslicht in ein dunkles Gewölbe tritt, ist unempfindlich gegen das schwache Licht, welches dort herrscht, und kann seinen Weg nicht finden, während er nach wenigen Minuten, wenn sein Auge von dem starken Licht sich ausgeruht hat, anfängt, in dem dunkeln Raum sehr bequem zu sehen.

Im Auge lassen sich die hierher gehörigen Erscheinungen so bequem studieren, weil man einzelne Stellen des Augengrundes ermüden kann, andere ausruhen, und die Empfindungen in beiden nachher vergleichen. Man lege ein Stückchen schwarzes Papier auf ein mäßig hell beleuchtetes weißes Blatt, fixiere kurze Zeit einen bestimmten Punkt auf oder in der Nähe des schwarzen Papieres und ziehe dieses

plötzlich weg; man wird dann ein sogenanntes Nachbild des schwarzen auf dem weißen Blatt sehen, indem die ganze Stelle, wo das Schwarz gelegen hat, jetzt in hellerem Weiß erscheint als der Rest des weißen Papieres. Die Stelle des Auges nämlich, auf welcher das Schwarz abgebildet war, ist ausgeruht im Vergleich mit denjenigen Stellen, welche vorher von dem Bilde des Weiß getroffen wurden, und mit der ausgeruhten Stelle sehen wir deshalb das Weiß in seinem ersten frischen Glanz, während es denjenigen Stellen der Netzhaut, die schon eine Weile durch seine Einwirkung ermüdet sind, merklich grau erscheint.

Bei fortdauernd gleichmäßiger Einwirkung des Lichtreizes führt also dieser Reiz selbst eine Abstumpfung der Empfindlichkeit herbei, wodurch das Organ vor einer zu anhaltenden und heftigen Erregung geschützt wird.

Anders verhält es sich dagegen, wenn wir intermittierendes Licht auf das Auge wirken lassen, Lichtblitze mit zwischenliegenden Pausen. Während der Pausen stellt sich die Empfindlichkeit einigermaßen wieder her, und der neue Reiz wirkt also viel intensiver, als wenn er in derselben Stärke dauernd eingewirkt hätte. Jedermann weiß, wie äußerst unangenehm und quälend eine flimmernde Beleuchtung ist, selbst wenn sie an sich verhältnismäßig sehr schwach ist, z. B. von einer kleinen flackernden Kerze herrührt.

Auch mit den Tastnerven verhält es sich ähnlich. Reiben mit dem Nagel ist für die Haut viel empfindlicher, als dauernde Berührung einer Stelle mit demselben Nagel bei demselben Druck. Das Unangenehme des Kratzens, Reibens, Kitzelns beruht darauf, daß sie alle eine intermittierende Reizung der Tastnerven hervorbringen.

Ein knarrender, intermittierender Ton ist für die Gehörnerven dasselbe, wie flackerndes Licht für die Gesichtsnerven und Kratzen für die Haut. Es wird dadurch eine viel intensivere und unangenehmere Reizung des Organes hervorgebracht, als durch einen gleichmäßig andauernden Ton. Dies zeigt sich namentlich auch, wenn wir sehr schwache intermittierende Klänge vernehmen. Wenn man eine angeschlagene Stimmgabel so weit vom Ohr entfernt, daß man aufhört, ihren Ton zu vernehmen, so tritt er sogleich wieder ein, wenn man den Stiel der Gabel einigemal zwischen den Fingern herumdreht. Dabei kommt die Gabel nämlich abwechselnd in solche Lagen, wo sie dem Ohr ihren Schall zusendet, und solche, wo sie dies nicht tut; und dieser Wechsel der Tonstärke wird dem Ohr sogleich vernehmbar.

Eben deshalb besteht eines der feinsten Mittel, das Dasein eines sehr schwachen Tones wahrzunehmen, darin, daß man einen zweiten Ton von ungefähr gleicher Stärke hinzubringt, der mit dem ersten zwei bis vier Schwebungen in der Sekunde macht. Dann wechselt die Tonstärke zwischen Null und dem Vierfachen der Stärke des einfachen Tones, und sowohl diese Verstärkung als der Wechsel tragen dazu bei, sie dem Ohr vernehmbar zu machen.

Ebenso wie hier bei den allerschwächsten Klängen der Wechsel der Tonstärke dazu dienen kann, ihren Eindruck auf das Ohr zu verstärken, so, dürfen wir schließen, muß dasselbe Moment dazu dienen, auch den Eindruck stärkerer Töne viel eindringlicher und heftiger zu machen, als er bei gleichmäßig anhaltender Tonstärke ist.

Wir haben bisher die Erscheinungen beschrieben, wie sie sich darbieten bei solchen Schwebungen, welche die Zahl von 20 bis 30 in der Sekunde nicht überschreiten. Wir haben gesehen, daß die Schwebungen in mittlerer Gegend der Skala noch vollkommen deutlich bleiben und eine Reihe voneinander gesonderter Tonstöße bilden. Damit ist aber die Grenze ihrer Zahl noch nicht erreicht.

Das Intervall *h' c''* gab uns 33 Schwebungen in der Sekunde, welche den Zusammenklang scharf schwirrend machen. Das Intervall eines ganzen Tones *b' c''* gibt nahe die doppelte Anzahl; diese sind aber viel weniger scharf als die des ersten engeren Intervalles. Endlich sollte uns das Intervall der kleinen Terz *a' c''* der Rechnung nach 88 Schwebungen in der Sekunde geben; in der Tat läßt aber das letztere Intervall kaum noch etwas von der Rauhigkeit hören, welche die Schwebungen der engeren Intervalle hervorbringen. Man könnte nun vermuten, daß es die wachsende Zahl der Schwebungen sei, welche ihren Eindruck verwische und sie unhörbar mache. Wir würden für diese Vermutung die Analogie des Auges haben, welches ebenfalls nicht mehr imstande ist, eine Reihe schnell aufeinander folgender Lichteindrücke voneinander zu sondern, wenn deren Anzahl zu groß wird. Man denke an eine im Kreise umgeschwungene glühende Kohle. Wenn diese etwa 10 bis 15 mal in der Sekunde ihre Kreisbahn zurücklegt, glaubt das Auge einen kontinuierlichen feurigen Kreis zu sehen. Ebenso auf den Farbenscheiben, deren Anblick den meisten meiner Leser bekannt sein wird. Wenn eine solche Scheibe mehr als zehnmal in der Sekunde umläuft, vermischen sich die ver-

schiedenen auf sie aufgetragenen Farben zu einem ganz ruhigen Eindruck ihrer Mischfarbe. Nur bei sehr intensivem Licht muß der Wechsel der verschiedenfarbigen Felder schneller, 20 bis 30 mal in der Sekunde, geschehen. Es tritt also beim Auge eine ganz ähnliche Erscheinung wie beim Ohr ein. Wenn der Wechsel zwischen Reizung und Ruhe zu schnell geschieht, so verwischt sich der Wechsel in der Empfindung, die letztere wird kontinuierlich und anhaltend.

Indessen können wir uns beim Ohr zunächst davon überzeugen, daß die Steigerung der Zahl der Schwebungen nicht die alleinige Ursache davon ist, daß sie in der Empfindung sich verwischen. Indem wir nämlich von dem Intervall eines halben Tones $h'c''$ zu dem einer kleinen Terz $a'c''$ übergingen, haben wir nicht bloß die Zahl der Schwebungen, sondern auch die Breite des Intervalles vergrößert. Wir können aber auch die Zahl der Schwebungen vergrößern, ohne das Intervall zu verändern, indem wir dasselbe Intervall in eine höhere Gegend der Skala verlegen. Nehmen wir statt $h'c''$ die beiden Töne eine Oktave höher, $h''c'''$, so erhalten wir 66 Schwebungen, in der Lage $h'''c''''$ sogar 132 Schwebungen, und diese sind wirklich hörbar in derselben Weise, wie die 33 Schwebungen von $h'c''$, wenn sie auch allerdings in den ganz hohen Lagen schwächer werden. Doch sind z. B. die 66 Schwebungen des Intervalles $h''c'''$ viel schärfer und eindringlicher, als die gleiche Anzahl derer des Ganztones $b'c''$, und die 88 des Intervalles $e'''f'''$ noch sehr deutlich, während die der kleinen Terz $a'c''$ so gut wie unhörbar sind. Diese meine Behauptung, daß bis zu 132 Schwebungen in der Sekunde sollen gehört werden können, wird den Akustikern vielleicht fremdartig und unglaublich vorkommen. Aber der Versuch ist leicht auszuführen, und wenn man auf einem Instrument, welches aushaltende Töne gibt, z. B. Orgel oder Harmonium, eine Reihe von Halbtonintervallen anschlägt, in der Tiefe anfangend und sie allmählich höher und höher nimmt, so hört man in der Tiefe ganz langsame Schwebungen (H_1C gibt $4^1/_8$, Hc gibt $8^1/_4$, hc' gibt $16^1/_2$). Je höher man in der Skala steigt, desto größer wird ihre Zahl, während der Charakter der Empfindung durchaus unverändert bleibt. Und so kann man stufenweise von 4 zu 132 Schwebungen in der Sekunde übergehen und sich überzeugen, daß zwar die Fähigkeit, sie zu zählen, aufhört, aber nicht ihr Charakter als einer Reihe von Tonstößen, welche eine intermittierende Empfindung hervorbringen, ver-

loren geht. Allerdings muß aber dabei bemerkt werden, daß die Stöße auch in den hohen Regionen der Skala viel schärfer und deutlicher werden, wenn man ihre Zahl vermindert, indem man Intervalle von Vierteltönen oder noch kleinere nimmt. Die eindringlichste Rauhigkeit entsteht auch in den oberen Teilen der Skala durch eine Zahl von 30 bis 40 Schwebungen. Hohe Töne sind deshalb beim Zusammenklang viel empfindlicher gegen Verstimmung um einen Bruchteil eines halben Tones, als tiefe. Während zwei *c'*, welche um den zehnten Teil eines Halbtones voneinander abweichen, nur etwa eine Schwebung in der Sekunde geben, was nur bei aufmerksamer Beobachtung bemerkt wird und wenigstens keine Rauhigkeit gibt, bringen zwei *c''* bei derselben Verstimmung vier, zwei *c'''* acht Schwebungen hervor, was sehr unangenehm auffällt. Auch der Charakter der Rauhigkeit ist nach der Zahl der Schwebungen verschieden. Langsamere Schwebungen geben gleichsam eine gröbere Art von Rauhigkeit, die man als Knattern oder Knarren bezeichnen könnte; schnellere geben eine feinere und schärfere Rauhigkeit.

Die große Zahl der Schwebungen ist es also nicht, oder wenigstens nicht allein, wodurch sie unhörbar werden, sondern auch die Größe des Intervalles hat Einfluß, und deshalb kann man mit hohen Tönen schnellere wahrnehmbare Schwebungen erzeugen, als mit tiefen Tönen.

Die Beobachtungen lehren also einerseits, daß gleich große Intervalle keineswegs in allen Gegenden der Skala gleich deutliche Schwebungen geben. In der Höhe werden vielmehr die Schwebungen wegen wachsender Anzahl undeutlicher. Die Schwebungen eines halben Tones erhalten sich bis zur oberen Grenze der viergestrichenen Oktave deutlich; dies ist auch ungefähr die Grenze der zu Harmonieverbindungen brauchbaren musikalischen Töne. Die Schwebungen eines ganzen Tones, welche in tiefer Lage sehr deutlich und kräftig sind, sind an der oberen Grenze der dreigestrichenen Oktave kaum noch hörbar. Die große und kleine Terz dagegen, welche in der Mitte der Skala als Konsonanzen betrachtet werden dürfen und bei reiner Stimmung kaum etwas von Rauhigkeit erkennen lassen, klingen in den tieferen Oktaven sehr rauh und geben deutliche Schwebungen.

Andererseits hängt aber die Deutlichkeit der Schwebungen und die Rauhigkeit des Zusammenklanges, wie wir gesehen haben, auch nicht allein von der Zahl der Schwebungen ab. Denn wenn wir von

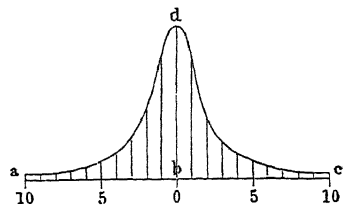
der Größe des Intervalles absehen dürften, müßten gleiche Rauhigkeit haben folgende Intervalle, welche der Rechnung nach die gleiche Anzahl von 33 Schwebungen geben sollten:

der Halbton . . . . . $h'c''$
die Ganztöne . . . . . $c'd'$ und $d'e'$
„ kleine Terz . . . . . eg
„ große Terz . . . . . ce
„ Quarte . . . . . Gc
„ Quinte . . . . . CG

während wir vielmehr finden, daß diese tieferen Intervalle immer mehr und mehr von Rauhigkeit frei werden.

Die Rauhigkeit des Zusammenklanges hängt also in einer zusammengesetzten Weise von der Größe des Intervalles und von der Zahl der Schwebungen ab. Wenn wir nun die Gründe dieser Abhängigkeit aufsuchen, so haben wir oben schon hervorgehoben, daß Schwebungen im Ohr nur bestehen können, wenn zwei Töne angegeben werden, welche in der Skala einander nahe genug sind, um dieselben elastischen Nervenanhängsel gleichzeitig in Mitschwingen zu versetzen. Wenn sich die beiden angegebenen Töne zu weit voneinander entfernen, werden die Schwingungen der von ihnen gemeinsam erregten Cortischen Organe zu schwach, als daß deren Schwebungen noch merklich empfunden werden könnten, vorausgesetzt, daß sich keine Obertöne und Kombinationstöne einmischen. Nach den Annahmen, die wir über den Grad der Dämpfung der Cortischen Organe im vorigen Abschnitt schätzungsweise gemacht haben, würde sich z. B. ergeben, daß bei der Differenz beider Töne um einen ganzen Ton *c d* die Cortischen Fasern, deren Eigenton *cis* ist, durch jeden der beiden Töne um $^1/_{10}$ seiner eigenen Intensität erregt werden; sie werden also schwanken zwischen der Intensität 0 und $^4/_{10}$. Geben wir dagegen die einfachen Töne *c* und *cis* an, so folgt aus der dort gegebenen Tabelle, daß die der Mitte zwischen *c* und *cis* entsprechenden Cortischen Fasern zwischen der Intensität 0 und $^{12}/_{10}$ wechseln werden. Umgekehrt würde dieselbe Intensität der Schwebungen für eine kleine Terz nur noch 0,194 betragen, für eine große Terz 0,108, also neben den beiden primären Tönen von der

Fig. 59.



Intensität 1 fast unmerklich werden müssen. Die Fig. 59, welche wir dort gebraucht haben, um die Stärke des Mitschwingens der Cortischen Fasern bei wachsender Tondifferenz auszudrücken, kann auch hier dienen, um die Stärke der Schwebungen darzustellen, welche zwei Töne im Ohr erregen bei verschiedenem Abstand in der Skala. Nur müssen wir die auf der Grundlinie abgemessenen Teile so nehmen, daß 5 der Distanz eines ganzen Tones entspricht, nicht wie oben der eines halben Tones. In unserem Falle ist nämlich die Entfernung beider Töne voneinander doppelt so groß, als die der mitten zwischen liegenden Cortischen Organe von jedem einzelnen.

Wäre die Dämpfung der Cortischen Organe in allen Teilen der Skala gleich groß, und hätte die Zahl der Schwebungen keinen Einfluß auf die Rauhigkeit der Empfindung, so würden gleiche Intervalle in allen Teilen der Skala gleich rauh zusammenklingen müssen. Da dies nun nicht der Fall ist, sondern nach der Höhe hin dieselben Intervalle minder rauh, nach der Tiefe rauher werden, so würde man entweder annehmen müssen, daß die Dämpfung der höher klingenden Cortischen Organe geringer sei, als der tieferen, oder wir müssen annehmen, daß die Unterscheidung schneller Schwebungen in der Empfindung auf Schwierigkeiten stoße.

Ich sehe noch keinen Weg, zwischen diesen beiden Annahmen zu entscheiden; doch dürfen wir wohl die erstere für die unwahrscheinlichere erklären, weil es wenigstens bei allen unseren künstlichen musikalischen Instrumenten desto schwerer wird, einen schwingenden Körper gegen die Abgabe seiner Schwingungen an seine Umgebung zu isolieren, je höher sein Ton ist. Ganz kurze, hoch klingende Saiten, kleine Metallzungen oder Platten usw. geben außerordentlich kurz abklingende hohe Töne, während man tiefere Töne mit entsprechenden größeren Körpern leicht lang ausklingend machen kann. Für die zweite Annahme spricht dagegen die Analogie der anderen Nervenapparate des menschlichen Körpers, namentlich des Auges. Ich habe schon angeführt, daß eine Reihe schnell und regelmäßig aufeinander folgender Lichteindrücke im Auge eine gleichmäßig anhaltende Lichtempfindung erregt. Wenn die Lichtreize sehr schnell aufeinander folgen, dauert der Eindruck eines jeden einzelnen im Nerven ungeschwächt fort, bis der nächste eintritt, und so werden die Pausen in der Empfindung nicht mehr unterschieden. Beim Auge

kann die Zahl der einzelnen Erregungen nicht über 40 in der Sekunde steigen, ohne daß sie vollkommen in einen zusammenhängenden Eindruck verschmelzen. Hierin wird das Auge vom Ohr bei weitem übertroffen, indem bis zu 132 Intermissionen in der Sekunde unterschieden werden können, und wahrscheinlich haben wir damit die obere Grenze noch nicht erreicht. Viel höhere und hinreichend starke Töne würden vielleicht noch mehr hören lassen. Es liegt in der Natur der Sache, daß die verschiedenen Sinnesapparate in dieser Beziehung einen verschiedenen Grad von Beweglichkeit zeigen, da es nicht bloß auf die Beweglichkeit der Nervenmolekeln ankommt, sondern auch auf die Beweglichkeit derjenigen Hilfsapparate, mittels deren die Erregung der Nerven zustande kommt oder sich äußert. Die Muskeln sind viel träger als das Auge; zehn elektrische Entladungen durch den Nerven während einer Sekunde genügen im allgemeinen, die Muskeln der willkürlich bewegten Teile des Körpers in dauernde Kontraktion zu bringen. Für die Muskeln der unwillkürlich bewegten Teile des Darmes, der Gefäße usw. können die Pausen zwischen den Reizungen auf eine ganze oder selbst mehrere ganze Sekunden steigen, ohne daß die Kontinuität der Zusammenziehung aufhört.

Das Ohr zeigt den übrigen Nervenapparaten gegenüber eine große Überlegenheit in dieser Beziehung, es ist in eminentem Grade das Organ für kleine Zeitunterschiede und wurde als solches von den Astronomen längst benutzt. Es ist bekannt, daß, wenn zwei Pendel nebeneinander schlagen, durch das Ohr bis auf ungefähr $^1/_{100}$ Sekunde unterschieden werden kann, ob ihre Schläge zusammentreffen oder nicht. Das Auge würde schon bei $^1/_{24}$ Sekunde, oder selbst noch bei viel größeren Bruchteilen einer Sekunde scheitern, wenn es entscheiden sollte, ob zwei Lichtblitze zusammentreffen oder nicht.

Wenn aber auch das Ohr in dieser Beziehung seine Überlegenheit über andere Organe des Körpers erweist, so dürfen wir doch wohl nicht zögern, vorauszusetzen, daß es in derselben Weise wie die anderen Nervenapparate eine Grenze der Schnelligkeit für sein Auffassungsvermögen haben wird, und wir dürfen wohl annehmen, daß wir uns dieser Grenze nähern, wenn wir 132 Schwebungen in der Sekunde nur schwach unterscheiden können.

Neunter Abschnitt.

Tiefe und tiefste Töne.

Die Schwebungen geben uns ein wichtiges Mittel ab, die Grenze der tiefsten Töne zu bestimmen und über gewisse Eigentümlichkeiten des Überganges von der Empfindung getrennter Luftstöße zu der eines ganz kontinuierlichen Klanges Rechenschaft zu geben, an welche Aufgabe wir zunächst gehen wollen.

Auf die Frage, wie groß die kleinste Zahl von Schwingungen sei, welche noch die Empfindung eines Tones hervorrufen könne, sind bisher sehr widersprechende Antworten gegeben worden. Die Angaben der verschiedenen Beobachter schwanken zwischen 8 (Savart) und etwa 30 ganzen Schwingungen für die Sekunde. Der Widerspruch erklärt sich durch gewisse Schwierigkeiten der Versuche.

Erstens nämlich ist es nötig, die Stärke der Luftschwingungen für sehr tiefe Töne außerordentlich viel größer zu machen als für hohe, wenn sie einen ebenso starken Eindruck auf das Ohr machen sollen. Es ist von mehreren Akustikern zuweilen die Voraussetzung ausgesprochen worden, daß unter übrigens gleichen Umständen die Stärke der Töne verschiedener Höhe der lebendigen Kraft der Luftbewegung direkt proportional sei, oder, was auf dasselbe herauskommt, der Größe der zu ihrer Hervorbringung aufgewandten mechanischen Arbeit; aber ein einfacher Versuch mit der Sirene zeigt, daß, wenn die gleiche mechanische Arbeit aufgewendet wird, um tiefe oder hohe Töne unter übrigens gleichen Verhältnissen zu erzeugen, die hohen Töne eine außerordentlich viel stärkere Empfindung hervorrufen als die tiefen. Wenn man nämlich die Sirene durch einen Blasebalg anbläst, so daß ihre Scheibe immer schneller und schneller umläuft, und wenn man dabei darauf achtet, die Bewegung des Blasebalges ganz gleichmäßig zu unterhalten, so daß sein Hebel gleich oft in der

Minute und immer um dieselbe Größe gehoben wird, wobei denn auch der Balg gleichmäßig gefüllt bleibt und immer dieselbe Menge Luft unter gleichem Druck in die Sirene getrieben wird: so hat man anfangs, solange die Sirene langsam läuft, einen schwachen tiefen Ton, der immer höher und höher wird, dabei aber gleichzeitig an Stärke außerordentlich zunimmt, so daß die höchsten Töne von etwa 880 Schwingungen, die ich auf meiner Doppelsirene hervorbringe, eine kaum ertragbare Stärke haben. Hierbei wird fortdauernd bei weitem der größte Teil der sich gleichbleibenden mechanischen Arbeit auf die Erzeugung der Schallbewegung verwendet, und nur ein kleiner Teil kann durch die Reibung der umlaufenden Scheibe in ihren Achsenlagern und durch die mit ihr in Wirbelbewegung gesetzte Luft verloren gehen. Diese Verluste müssen bei schneller Rotation größer werden als bei langsamer, so daß für die Hervorbringung der hohen Töne sogar weniger Arbeitskraft übrigbleibt, als für die tiefen; und doch erscheinen in der Empfindung die hohen Töne so außerordentlich viel stärker, als die tiefen Töne. Wie weit übrigens diese Steigerung nach der Höhe sich fortsetzt, kann ich bisher nicht angeben, weil die Geschwindigkeit meiner Sirene bei demselben Luftdruck eben nicht weiter gesteigert werden kann.

Die Zunahme der Tonstärke mit der Tonhöhe ist besonders bedeutend in den tiefsten Gegenden der Skala. Daraus folgt denn weiter, daß in zusammengesetzten Klängen von großer Tiefe die Obertöne den Grundton an Stärke übertreffen können, selbst wenn in Klängen derselben Art, aber von größerer Höhe, die Stärke des Grundtones bei weitem überwiegt. Es ist dies leicht zu erweisen mittels meiner Doppelsirene, da man an dieser mittels der Schwebungen immer leicht feststellen kann, ob ein gehörter Ton der Grundton, der zweite oder dritte Ton des betreffenden Klanges sei. Wenn man nämlich an beiden Windkästen die Reihen von 12 Löchern öffnet und die Kurbel, welche den oberen Kasten bewegt, einmal umdreht, gibt der Grundton, wie oben auseinander gesetzt ist, 4 Schwebungen, der zweite Ton 8, der dritte 12. Läßt man nun die Scheiben langsamer als gewöhnlich umlaufen, zu welchem Zwecke ich an dem Rande der einen Scheibe eine mit Öl benetzte Stahlfeder unter verschiedenem Druck schleifen lasse, so kann man leicht Reihen von Luftstößen erzeugen, die sehr tiefen Tönen entsprechen, dann die

Kurbel drehen und die Schwebungen zählen. Läßt man die Geschwindigkeit der Scheiben allmählich steigen, so findet man, daß die zuerst entstehenden hörbaren Töne 12 Schwebungen bei einer Umdrehung der Kurbel machen, solange die Zahl der Luftstöße noch unter 36 bis 40 ist. Bei Tönen zwischen 40 und 80 Luftstößen hört man bei jeder Drehung der Kurbel acht Schwebungen. Hier ist also die höhere Oktave des Grundtones der stärkste Ton. Erst bei mehr als 80 Luftstößen hört man die vier Schwebungen des Grundtones.

Es wird durch diese Versuche bewiesen, daß Luftbewegungen, deren Form nicht die der pendelartigen Schwingungen ist, deutliche und starke Empfindungen von Tönen hervorrufen können, deren Schwingungszahl zwei- oder dreimal so groß als die Zahl der Luftstöße ist, ohne daß der Grundton durchgehört wird. Wenn man in der Skala immer tiefer hinabgeht, nimmt die Empfindungsstärke, wie man hieraus schließen muß, so schnell ab, daß der Grundton, dessen lebendige Kraft an und für sich größer ist, als die der Obertöne, wie sich bei höherer Lage desselben Klanges erweist, doch übertönt und verdeckt wird von seinen Obertönen. Auch wenn die Wirkung des Klanges auf das Ohr erheblich verstärkt wird, ändert sich die Sache nicht. Es wurde bei den Versuchen mit der Sirene die oberste Platte des Blasebalges durch die tiefen Töne in heftige Erschütterung versetzt, und wenn ich den Kopf auflegte, wurde mein ganzer Kopf so kräftig in Mitschwingung versetzt, daß ich die Löcher der rotierenden Sirenenscheiben, welche dem ruhenden Auge verschwinden, wieder einzeln sehen konnte vermöge einer ähnlichen optischen Wirkung, wie sie bei den stroboskopischen Scheiben vorkommt. Die angeblasene Löcherreihe schien festzustehen, die anderen Reihen bewegten sich teils vorwärts, teils rückwärts, und doch wurden die tiefsten Töne nicht deutlicher. Ein anderes Mal verband ich meinen Gehörgang durch eine passend eingeführte Röhre mit einer Öffnung, die in das Innere des Blasebalges führte. Die Erschütterungen des Trommelfelles waren so stark, daß sie einen unleidlichen Kitzel verursachten, aber dennoch wurden die tiefsten Töne nicht deutlicher.

Will man also die Grenze der tiefsten Töne ermitteln, so ist es notwendig, nicht nur sehr starke Lufterschütterungen hervorzubringen, sondern ihnen auch die Form der einfachen pendelartigen Schwingungen zu geben. Solange die letztere Bedingung nicht erfüllt ist, ist man

durchaus nicht sicher, ob die gehörten tiefen Töne dem Grundton oder den Obertönen der Luftbewegung entsprechen[1]). Unter den bisher angewendeten Instrumenten sind die weiten gedackten Orgelpfeifen wohl die zweckmäßigsten. Ihre Obertöne sind wenigstens ziemlich schwach, wenn sie auch nicht ganz fehlen. Hier findet man, daß schon die unteren Töne der 16füßigen Oktave, C_1 bis E_1, anfangen, in ein dröhnendes Geräusch überzugehen, so daß es selbst einem geübten musikalischen Ohr sehr schwer wird, ihre Tonhöhe sicher anzugeben; auch können sie nicht mit Hilfe des Ohres allein gestimmt werden, sondern nur indirekt mittels der Schwebungen, welche sie mit den Tönen der höheren Oktaven geben. Ähnliches bemerkt man auch an denselben tiefsten Tönen des Klaviers und der Physharmonika; sie klingen dröhnend und unrein in der Stimmung, obgleich ihr musikalischer Charakter durch die starken sie begleitenden Obertöne im ganzen besser festgestellt ist, als der der Pfeifentöne. In der künstlerisch vollendeten Musik des Orchesters ist deshalb auch der tiefste Ton, welcher angewendet wird, das E_1 des Kontrabasses von 41 Schwingungen; und ich glaube mit Sicherheit voraussagen zu können, daß alle Anstrengungen der neueren Technik, tiefere gut musikalische Töne hervorzubringen, scheitern müssen, nicht weil es an Mitteln fehlte, passende Luftbewegungen zu erregen, sondern weil das menschliche Ohr seine Dienste versagt. Das 16füßige C_1 der Orgel von 33 Schwingungen gibt allerdings noch eine ziemlich kontinuierliche Empfindung von Dröhnen, aber ohne daß man ihm einen bestimmten Wert in der musikalischen Skala zuschreiben könnte. Vielmehr fängt man hier schon an, die einzelnen Luftstöße zu merken, trotz der regelmäßigen Form der Bewegung. In der oberen Hälfte der 32füßigen Oktave wird die Empfindung der einzelnen Luftstöße immer deutlicher, der kontinuierliche Teil der Empfindung, den man noch mit einer Tonempfindung vergleichen könnte, immer schwächer, und in der tieferen Hälfte der 32füßigen Oktave hört man wohl eigentlich nichts mehr, als die einzelnen Luftstöße, oder wenn man noch etwas anderes

[1]) Namentlich ist Savarts Instrument, wo ein rotierender Stab durch enge Spalten schlägt, ganz ungeeignet, tiefste Töne hörbar zu machen. Die einzelnen Luftstöße sind hier sehr kurz im Vergleich zur ganzen Schwingungsperiode; also müssen auch die Obertöne sehr stark entwickelt sein, und die tiefsten Töne, welche man hört bei 8 bis 16 Schlägen, können nichts als Obertöne sein.

hört, so können es wohl nur schwache Obertöne sein, von denen auch die Klänge der gedackten Pfeifen nicht ganz frei sind.

Ich habe noch auf eine andere Weise tiefe einfache Töne zu erzeugen versucht. Saiten, welche in ihrer Mitte ein schwereres Metallstück tragen, geben, wenn sie angeschlagen werden, einen Klang, der aus einer Anzahl zueinander nicht harmonischer Töne besteht. Der Grundton ist durch ein Intervall von mehreren Oktaven von den nächsten Obertönen getrennt, und man kommt deshalb nicht in Gefahr, ihn mit diesen zu verwechseln; außerdem verklingen die höheren Töne sehr schnell, während die tiefen sehr lange anhalten. Eine solche Saite[1]) wurde auf einem Resonanzkasten ausgespannt, der nur eine Öffnung hatte, und diese konnte durch eine Röhre mit dem Gehörgang verbunden werden, so daß die Luft des Resonanzkastens nur in das Ohr hinein entweichen konnte. Die Töne einer Saite von gewöhnlicher Höhe sind unter diesen Umständen von unerträglicher Stärke. Dagegen rief schon das D_1 von 37 Schwingungen nur noch eine sehr schwache Tonempfindung hervor, und auch diese hatte etwas Knarrendes, was darauf schließen läßt, daß das Ohr auch hier anfing, die einzelnen Stöße trotz ihrer regelmäßigen Form einzeln zu empfinden. Bei B_2 (34 Schwingungen) war kaum noch etwas zu hören. Es scheint also, daß diejenigen Nervenfasern, welche diese Töne empfinden, schon nicht mehr während der ganzen Dauer einer Schwingung gleichmäßig stark erregt werden, sei es nun, daß die Phasen der stärksten Geschwindigkeit oder die Phasen der stärksten Abweichung der schwingenden Gebilde im Ohr die Erregung bewirken[2]).

---

[1]) Es war eine dünne messingene Klaviersaite. Die Belastung bestand in einem kupfernen Kreuzerstück, welches in der Mitte durchbohrt war. Nachdem die Saite durch die Öffnung gesteckt war, wurde das Kupfer mittels einer neben die Öffnung aufgesetzten stählernen Spitze, welche durch Hammerschläge eingetrieben wurde, komprimiert, so daß es die Saite in der Öffnung fest und unverrückbar einschloß.

[2]) Ich habe seitdem von Herrn König in Paris zwei große Stimmgabeln erhalten, an deren Zinken Gewichte verschiebbar sind. Durch Verschiebung derselben ändert man die Stimmung, die Zahl der dadurch entstehenden Schwingungen ist auf einer Skala angegeben, die an den Zinken entlang läuft. Die eine gibt Töne von 24 bis 35, die andere von 35 bis 61 Schwingungen. Die verschiebbaren Gewichte haben die Form von Platten, 5 cm im Durchmesser; je eine dieser Platten ist ein Spiegel. Bringt man das Ohr ganz nahe an diese Platten, so hört man die tiefen Töne sehr gut. Bei 30 Schwingungen hört man noch deutlich einen schwachen dröhnenden Ton, bei 28 kaum noch eine Spur, obgleich man leicht Oszillationen von 9 mm

Wenn also auch bei etwas kleineren Schwingungszahlen (24 oder 28) Töne gehört werden, so fangen doch erst bei 40 Schwingungen die Töne an, eine bestimmte musikalische Höhe zu bekommen. Der Hypothese über die elastischen Anhangsgebilde der Nerven ordnen sich diese Tatsachen unter, wenn man bedenkt, daß die tiefgestimmtesten Cortischen Fasern auch von noch tieferen Tönen zum Mitschwingen gebracht werden können, wenn auch in schnell abnehmender Stärke, wobei also wohl noch Tonempfindung, aber keine Unterscheidung der Tonhöhe mehr möglich ist. Wenn die tiefsten Cortischen Fasern größere Abstände in der Skala haben, gleichzeitig aber auch ihre Dämpfung so stark ist, daß von jedem Ton, der der Höhe einer Faser entspricht, auch die Nachbarfasern noch ziemlich stark affiziert werden, so wird die Unterscheidung der Tonhöhe in solchen Gegenden der Skala unsicher sein, aber doch kontinuierlich ohne Sprünge vor sich gehen, und gleichzeitig wird die Stärke der Empfindung gering werden müssen.

Während nun die einfachen Töne in der oberen Hälfte der 16füßigen Oktave schon vollkommen kontinuierlich und musikalisch klingen, verschwindet die Wahrnehmung der einzelnen Luftstöße bei Luftschwingungen von abweichender Form, also bei zusammengesetzten Klängen, auch selbst in der Kontraoktave noch nicht vollständig.

Amplitude in dieser Weise ganz dicht vor dem Ohr erzeugen kann. Herr W. Preyer hat auf diese Weise noch Töne von 24 Schwingungen hören können. Derselbe hat noch eine andere Methode gebraucht (Physiologische Abhandlungen, I. Reihe, Heft 1. Über die Grenzen der Tonwahrnehmung, S. 1 bis 17), wobei er sehr tiefe belastete Zungen in Zungenpfeifen, die zu diesem Zweck von Herrn Appun konstruiert waren und allen ganzen Schwingungszahlen von 8 bis 40 entsprachen, durch Anblasen in starke Schwingung versetzte und dann nach Unterbrechung des Windstromes das Ausschwingen der Zunge mit dem an ihren Kasten gelegten Ohr beobachtete. Er gibt an, die Töne bis zu 15 Schwingungen abwärts gehört zu haben. Der Beweis, daß die gehörten Töne den Grundtönen der Pfeifen entsprachen, beruht aber nur darauf, daß sie beim stufenweisen Aufsteigen in der Höhe in die besser hörbaren, dagegen sehr kurz abklingenden Töne von 25 bis 32 Schwingungen übergingen. Bei ausgiebigen Schwingungen können aber sehr wohl die Zungen ihrem Befestigungspunkt longitudinale Stöße von doppelter Schwingungszahl gegeben haben, weil sie, an beiden Enden ihrer Amplitude angelangt, wegen ihrer Biegung ihren Befestigungspunkt zurückdrängen, in der Mitte der Schwingung dagegen durch die Zentrifugalkraft ihres Gewichtes ihn nach sich ziehen. Da die Unterscheidung der Tonhöhe bei diesen tiefsten Tönen äußerst unvollkommen ist, fühle ich durch die Aussage des Ohres allein, wenn nicht durch Schwebungszählungen die Angaben kontrolliert sind, meine Zweifel nicht ganz beruhigt.

Wenn man z. B. die Scheibe der Sirene durch Anblasen in Bewegung setzt mit allmählich steigender Geschwindigkeit, so hört man anfangs nur die einzelnen Luftstöße, dann, wenn mehr als 36 Schwingungen da sind, auch schwache Töne daneben, welche zunächst aber Obertöne sind. Bei steigender Geschwindigkeit wird die Empfindung der Töne stärker und stärker, aber man hört noch lange nicht auf, die einzelnen Luftstöße wahrzunehmen, wenn diese auch immer mehr und mehr miteinander verschmelzen. Erst bei 110 oder 120 Schwingungen (*A* oder *B* der großen Oktave) wird der Klang ziemlich kontinuierlich. Ganz ähnlich verhält es sich auf dem Harmonium, wo im Hornregister das *c* von 132 Schwingungen noch etwas Schnarrendes hat, und im Fagottregister sogar das *c'* 264 Schwingungen. Überhaupt ist mehr oder weniger deutlich dasselbe zu bemerken bei allen scharfen, schnarrenden oder schmetternden Klängen, welche, wie schon früher erwähnt wurde, immer mit einer sehr großen Zahl deutlicher Obertöne versehen sind.

Der Grund dieser Erscheinung liegt in den Schwebungen, welche durch die in der Skala nahe zusammenliegenden hohen Obertöne dieser Klänge hervorgebracht werden. Wenn in einem Klang der 15. oder 16. Oberton noch hörbar sind, so bilden diese beiden miteinander das Intervall eines halben Tones und geben natürlich auch die scharfen Schwebungen einer solchen Dissonanz. Daß in der Tat die Schwebungen dieser Töne an der Rauhigkeit des ganzen Klanges schuld sind, kann man leicht beweisen, indem man eine passende Resonanzröhre an das Ohr bringt. Wenn G_1 von $49^1/_2$ Schwingungen angeschlagen wird, ist der 15. Ton des Klanges *fis''*, der 16. *g''*, der 17. *gis''* usw. Wenn ich nun die Resonanzröhre *g''* an das Ohr setze, welche die genannten Töne verstärkt, und zwar am meisten *g''* selbst, weniger *fis''* und *gis''*, so tritt die Rauhigkeit des Klanges außerordentlich viel schärfer hervor und wird ganz ähnlich dem scharfen Knarren, welches die Töne *fis''* und *g''* selbst angeschlagen geben. Dieser Versuch gelingt sowohl am Klavier, als mit beiden Registern des Harmoniums. Er gelingt auch noch deutlich bei höherer Tonlage, soweit die verstärkenden Resonanzröhren reichen. Ich habe eine solche für *g'''*, durch welche der Ton freilich nur noch wenig verstärkt wird, aber es war beim Ansatz der Röhre an das Ohr doch deutlich zu hören, wie die Rauhigkeit des *G* von 99 Schwingungen schärfer gemacht wird.

Auch schon der achte und neunte Ton eines Klanges, welche um das Intervall eines ganzen Tones voneinander entfernt sind, müssen Schwebungen geben, wenn auch weniger scharf eingeschnittene als die höheren Obertöne. Doch gelingt bei diesen die Verstärkung durch die Resonanzröhren nicht so gut, weil wenigstens die tieferen Röhren nicht imstande sind, zwei um einen ganzen Ton voneinander entfernte Töne gleichzeitig zu verstärken. Bei den höheren Röhren, wo die Verstärkung geringer ist, ist gleichzeitig das Intervall der verstärkten Töne breiter, und so gelang es mir auch, durch die Röhren g'' und g''' Rauhigkeiten der Töne G bis g (99 bis 198 Schwingungen) zu verstärken, welche von deren siebenten, achten und neunten Teiltönen (f'', g'' und a'' bis f''', g''' und a''') herrührten. Und wenn man den Klang des G in der Resonanzröhre mit dem Klang der direkt angeschlagenen Dissonanz $f''\ g''$ oder $g''\ a''$ vergleicht, so erkennt man auch, daß beide sehr ähnlich sind, daß namentlich die Schnelligkeit der Intermittenzen nahehin gleich ist.

Es kann hiernach nicht zweifelhaft bleiben, daß Luftbewegungen, welche tiefen und mit vielen Obertönen versehenen Klängen entsprechen, gleichzeitig eine kontinuierliche Empfindung tiefer Töne und diskontinuierliche Empfindungen hoher Töne erregen und durch diese letzteren rauh oder knarrend gemacht werden. Darin liegt die Erklärung der Tatsache, die wir früher bei der Untersuchung der Klangfarben fanden, daß Klänge mit vielen hohen Obertönen scharf, schnarrend oder schmetternd klingen; darin auch der Grund, warum sie viel durchdringender sind, und warum das Ohr sie nicht so leicht überhören kann. Denn ein intermittierender Eindruck erregt unsere Nervenapparate viel stärker als ein kontinuierlicher und drängt sich immer von neuem wieder der Wahrnehmung auf. Einfache Töne dagegen oder Klänge, welche nur wenige von den niederen weit auseinander liegenden Obertönen enthalten, müssen im Ohr vollkommen kontinuierliche Empfindungen hervorbringen, welche einen weichen, sanften und wenig energischen Eindruck machen, selbst wenn sie in der Tat verhältnismäßig große Stärke haben.

Wir haben bisher die äußerste Zahl der bei hohen Noten wahrnehmbaren Intermittenzen des Tones nicht bestimmen können und nur darauf aufmerksam gemacht, daß sie unter übrigens gleichen Bedingungen desto schwerer wahrnehmbar sind und einen desto

schwächeren Eindruck machen, je zahlreicher sie werden. Wenn also auch die Form der Luftbewegung, d. h. die Klangfarbe dieselbe bleibt, während die Höhe gesteigert wird, so wird im allgemeinen die Klangfarbe weniger rauh werden. Eine besonders wichtige Rolle muß hierbei namentlich die Gegend der Skala um das *fis''''* herum spielen, für welche das Ohr, wie oben bemerkt wurde, ganz besonders empfindlich ist. Dissonante Obertöne, welche in diese Gegend fallen, müssen besonders empfindlich sein. Das *fis''''* ist der achte Oberton des *fis'* von 367 Schwingungen, welches den höheren Tönen der Männer, den tieferen der Frauen zugehört, und der 16. Oberton des ungestrichenen *fis*, in der Mitte der Männerstimmen. Daß man bei angestrengten menschlichen Stimmen die genannten hohen Töne oft mitklingen hört, habe ich schon früher angeführt. Wenn dies bei den tieferen Tönen der Männerstimmen geschieht, so muß es in scharfen Dissonanzen geschehen; und in der Tat hört man, wie ich schon früher bemerkt habe, bei schmetterndem Forte einer kräftigen Baßstimme die hohen Nebentöne der viergestrichenen Oktave in einem gellenden Zittern begriffen. Daher ist das Knarren und Schmettern bei Baßstimmen auch viel häufiger und stärker als bei höheren Stimmen. Für Klänge, welche über das *fis'* hinaufgehen, sind die Dissonanzen der Nebentöne, welche in die viergestrichene Oktave fallen, schwächer als die Dissonanzen eines ganzen Tones, und diese in so großer Höhe wohl kaum noch so scharf, daß sie sich erheblich bemerklich machen könnten.

Auf diese Weise erklärt sich auch der im allgemeinen angenehmere Klang der hohen Stimmen und das daraus hervorgehende Drängen aller Sänger und Sängerinnen nach der Höhe. Dazu kommt dann noch, daß in den höheren Tonlagen kleine Verstimmungen eine viel größere Zahl von Schwebungen hervorrufen, als in den tieferen Lagen, wodurch auch das musikalische Gefühl für die Tonhöhe, für die Richtigkeit und Schönheit der musikalischen Intervalle viel sicherer wird als in der Tiefe.

Nach den Beobachtungen von Herrn W. Preyer verschwindet der Unterschied der Klangfarbe zwischen Stimmgabeln und Zungenpfeifen in der Höhe der c^v ganz und gar, zweifelsohne aus dem von ihm angegebenen Grunde, weil nämlich die Obertöne dann in die kaum noch hörbare sieben- oder achtgestrichene Oktave fallen.

Zehnter Abschnitt.

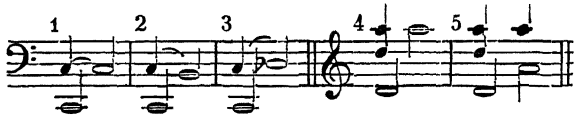
Schwebungen der Obertöne.

Wir haben bisher nur solche Schwebungen betrachtet, welche von je zwei einfachen Tönen hervorgerufen werden, ohne daß sich Obertöne oder Kombinationstöne einmischen. Es konnten dergleichen Schwebungen nur entstehen, wenn die beiden angegebenen Töne um ein verhältnismäßig kleines Intervall voneinander entfernt sind. Wenn ihre Entfernung auch nur zur Größe einer kleinen Terz anwächst, werden ihre Schwebungen undeutlich. Nun ist es aber bekannt, daß Schwebungen auch entstehen können durch je zwei Töne, welche um viel größere Intervalle voneinander abstehen, und wir werden später sehen, daß diese Schwebungen eine Hauptrolle bei der Feststellung der konsonanten Intervalle unserer musikalischen Tonleiter spielen; daher wir hier auf ihre Untersuchung näher eingehen müssen. Dergleichen Schwebungen von solchen Klängen, die in der Tonleiter weiter als eine kleine Terz voneinander entfernt sind, kommen zustande durch den Einfluß der Obertöne und der Kombinationstöne. Wenn die Klänge mit deutlich hörbaren Obertönen versehen sind, sind die Schwebungen, welche durch diese entstehen, meistens viel stärker und deutlicher als die der Kombinationstöne, auch ist der Grund dieser Schwebungen viel leichter nachzuweisen. Wir beginnen deshalb die Untersuchung der Schwebungen weiterer Intervalle mit den Schwebungen, welche durch Hilfe der Obertöne hervorgebracht werden. Aber allerdings ist zu bemerken, daß Schwebungen der Kombinationstöne viel allgemeiner vorkommen, bei allen Arten von Klängen, Schwebungen der Obertöne dagegen natürlich nur bei Klängen mit deutlich ausgesprochenen Obertönen. Da aber die musikalisch brauchbaren Klänge mit wenigen Ausnahmen reichlich mit kräftigen Obertönen versehen sind, so haben in der Musik die Schwebungen

der Obertöne verhältnismäßig eine viel größere praktische Wichtigkeit, als die Schwebungen der schwachen Kombinationstöne.

Wenn zwei mit Obertönen versehene Klänge angegeben werden, so ist es nach dem Bisherigen leicht ersichtlich, daß Schwebungen entstehen können, so oft je zwei Obertöne beider Klänge einander hinreichend nahe liegen, oder auch, wenn der Grundton des einen Klanges einem der Obertöne des anderen Klanges sich nähert. Die Zahl der Schwebungen ist natürlich wieder der Differenz der Schwingungszahlen der beiden betreffenden Teiltöne gleich, durch welche die Schwebungen hervorgerufen werden. Ist die Differenz der Schwingungszahlen klein, sind also die Schwebungen langsam, so sind sie, wie ähnlich langsame Schwebungen primärer Töne, verhältnismäßig am deutlichsten zu hören, zu zählen, und überhaupt ihrer ganzen Natur nach zu erkennen. Sie sind ferner desto deutlicher, je stärker diejenigen Teiltöne sind, durch welche sie entstehen; und das sind bei den gewöhnlich gebrauchten Klangfarben der musikalischen Instrumente die Teiltöne von niedriger Ordnungszahl, da in der Regel die Intensität der Teiltöne mit wachsender Ordnungszahl abnimmt.

Man beginne also mit Beispielen etwa folgender Art auf einer Orgel im Prinzipal- oder Geigenregister oder auf einem Harmonium:



Die halben Noten bedeuten in diesen Beispielen die Grundtöne der Klänge, welche angegeben werden sollen, die Viertelnoten die dazu gehörigen Obertöne. Wenn die Oktave *Cc* des ersten Beispieles rein gestimmt ist, wird sie keine Schwebungen hören lassen. Wenn man aber die höhere Note verändert wie im zweiten und dritten Beispiel, so daß sie *H* oder *des* wird, so erhält man dieselben Schwebungen, als hätte man direkt die beiden um einen halben Ton voneinander entfernten Töne *H—c* oder *c—des* angegeben. Die Zahl der Schwebungen ist dieselbe ($16^1/_2$ in der Sekunde), ihre Intensität allerdings eine etwas geringere, weil sie einigermaßen bedeckt werden durch den starken tiefen Ton *C*, und weil das *c*, welches zweiter Teilton des Klanges *C* ist, meist nicht dieselbe Intensität hat wie sein Grundton.

In Beispiel 4 und 5 wird man bei der gewöhnlichen temperierten Stimmung der Tastaturinstrumente Schwebungen hören, und zwar bei genauer Stimmung eine in der Sekunde, weil die Note *a''*, welche das Instrument angibt, nicht genau übereinstimmt mit dem *a''*, welches dritter Partialton des Klanges *d'* ist. Dagegen ist die Note *a''* des Instrumentes genau übereinstimmend mit dem *a''*, welches zweiter Partialton der Note *a'* im fünften Beispiel ist, daher wir in den Beispielen 4 und 5 auf einem gut gestimmten Instrument gleich viele Schwebungen erhalten müssen.

Da der erste Oberton doppelt soviel Schwingungen macht als sein Grundton, so ist im ersten Beispiel das direkt angegebene *c* mit dem ersten Oberton des tieferen *C* identisch, wenn das *c* genau doppelt soviel Schwingungen macht, als das *C*. Nur bei diesem Verhältnis der Schwingungszahlen von 1:2 können beide Klänge zusammenklingen, ohne Schwebungen zu geben. Die kleinste Abweichung des Intervalles *Cc* von dem angegebenen Zahlenverhältnis wird sich durch Schwebungen verraten müssen. Im vierten Beispiel werden die Schwebungen nur dann aufhören, wenn wir das *a''* des Instrumentes so stimmen, daß es dem dritten Partialton des Klanges *d* genau gleich wird, und dies wird nur dann der Fall sein, wenn die Schwingungszahl des *a''* genau dreimal so groß ist, als die des *d'*. Im fünften Beispiel werden wir die Schwingungszahl *a'* genau halb so groß machen müssen, als die des *a''*, welches dreimal soviel Schwingungen macht als *d'*, d. h. die Schwingungszahlen von *d'* und *a'* werden sich genau wie 2:3 verhalten müssen, wenn keine Schwebungen eintreten sollen. Jede Abweichung der zusammenklingenden Töne von diesem Zahlenverhältnis wird sich durch Schwebungen zu erkennen geben.

Daß die Schwingungszahlen zweier Klänge, die das Intervall einer Oktave miteinander bilden, im Verhältnis von 1:2, die einer Quinte im Verhältnis 2:3 stehen, haben wir schon oben angeführt. Es waren diese Zahlenverhältnisse längst gefunden, indem man bloß dem Ohr folgte und die angenehmsten Zusammenklänge je zweier Töne suchte. Hier haben wir nun den Grund gefunden, warum diese nach den einfachen Zahlenverhältnissen gestimmten Intervalle allein einen ruhigen Zusammenklang geben, während schon ganz geringe Abweichungen von der mathematischen Stimmung sich verraten durch die unruhig auf und ab wogenden Schwebungen. Das *d'* und *a'* des

letzten Beispieles, zu einer reinen Quinte gestimmt, machen $293^1/_3$ und 440 Schwingungen, ihr gemeinsamer Oberton a'' hat $3 . 293^1/_3 = 2 . 440 = 880$ Schwingungen. In der temperierten Stimmung macht das d' $293^2/_3$ Schwingungen, sein zweiter Oberton wird 881 und diese außerordentlich kleine Differenz verrät sich dem Ohr durch eine Schwebung in der Sekunde. Den Orgelbauern ist das Faktum, daß unreine Oktaven und unreine Quinten Schwebungen geben, längst bekannt, und es wird von ihnen benutzt, um schnell und sicher die verlangte reine oder temperierte Stimmung herstellen zu können, da es in der Tat kein empfindlicheres Mittel gibt, die Reinheit der Intervalle zu prüfen.

Zwei Klänge also, welche im Verhältnis einer reinen Oktave, einer reinen Duodezime oder reinen Quinte stehen, ertönen nebeneinander in ungestörtem, gleichmäßigem Abfluß, und unterscheiden sich dadurch von ihren nächst benachbarten Intervallen, den unreinen Oktaven oder Quinten, bei denen ein Teil der Klangmasse in einzelne Stöße zerfällt, so daß die beiden Klänge nicht ungestört nebeneinander hinfließen können. Deshalb nennen wir die reine Oktave, Duodezime und Quinte konsonante Intervalle im Gegensatz zu den ihnen nächst benachbarten Intervallen, welche wir dissonant nennen. Obgleich diese Namen längst gegeben waren, ehe man von den Obertönen und ihren Schwebungen etwas wußte, bezeichnen sie doch das Wesen der Sache, ungestörtes oder gestörtes Zusammenklingen, ganz richtig.

Da die hier beschriebenen Erscheinungen die wesentliche Grundlage für die Feststellung der normalen musikalischen Intervalle bilden, so wollen wir sie nach allen Richtungen hin experimentell fest begründen.

Zunächst habe ich behauptet, die Schwebungen seien Schwebungen derjenigen Partialtöne beider Klänge, welche nahehin zusammentreffen. Nun ist es nicht immer ganz leicht, wenn man eine schwach verstimmte Quinte oder Oktave hört, mit unbewaffnetem Ohr deutlich zu erkennen, welche Teile des Gesamtklanges in Schwebung begriffen sind. Es macht leicht den Eindruck, als höre man Verstärkungen und Schwächungen der ganzen Klangmasse. Indessen wird ein Ohr, welches geübt ist, die Obertöne zu unterscheiden, wenn es seine Aufmerksamkeit auf den betreffenden gemeinsamen Oberton fixiert, doch leicht die starken Schwebungen gerade dieses Tones hören, während die Grundtöne kontinuierlich fortklingen. Man gebe die Note d' an,

richte die Aufmerksamkeit auf ihren Oberton a'', lasse die temperierte Quinte a' hinzukommen, so wird man deutlich die Schwebungen des a'' hören können. Für ein ungeübtes Ohr sind in diesem Falle die früher beschriebenen Resonatoren von großem Nutzen. Setzt man den Resonator für a'' an das Ohr, so hört man die Schwebungen dieses Tones sehr einschneidend. Nimmt man dagegen einen Resonator für einen der Grundtöne d' oder a', so hört man die Schwebungen im Gegenteil schwächer, weil dadurch der kontinuierliche Teil des Tones verstärkt wird.

Diese Behauptung soll natürlich nicht so weit gehen, daß gar keine anderen Töne als das a'' des letzten Beispieles Schwebungen gäben. Im Gegenteil, es gibt noch höhere schwächere Obertöne, welche Schwebungen geben, und außerdem werden wir im nächsten Abschnitt die Schwebungen der Kombinationstöne kennen lernen, welche sich zu den hier beschriebenen Schwebungen der Obertöne gesellen. Die Schwebungen des tiefsten gemeinsamen Obertones spielen nur gewöhnlich die Hauptrolle, weil sie von allen die stärksten und die langsamsten sind.

Zweitens mag ein direkter experimenteller Beweis wünschenswert erscheinen, daß die von uns aus den Schwingungszahlen der Obertöne hergeleiteten Zahlenverhältnisse wirklich diejenigen sind, welche keine Schwebungen geben. Dieser Beweis kann am leichtesten durch die oben beschriebene Doppelsirene, Fig. 56, S. 270, gegeben werden. Man setze die Scheiben in Rotation und öffne an der unteren Scheibe die Reihe von acht, an der oberen von 16 Löchern, so erhält man beim Anblasen zwei Klänge, welche miteinander das Intervall einer Oktave bilden. Sie klingen zusammen ohne Schwebungen, solange der obere Kasten nicht gedreht wird. Sowie man aber anfängt, den oberen Kasten langsam umzudrehen, wodurch der Ton der oberen Scheibe etwas erhöht oder erniedrigt wird, hört man Schwebungen. Solange der obere Windkasten stillsteht, ist das Verhältnis der Schwingungszahlen genau 1 : 2, weil bei jeder Umdrehung der Scheibe der untere Kasten genau acht, der obere genau 16 Luftstöße gibt. Durch eine langsame Drehung der Kurbel kann man dieses Verhältnis um so wenig, als man will, verändern, aber bei jeder noch so langsamen Drehung hört man die Schwebungen, welche die Verstimmung des Intervalles ankündigen.

Ähnlich ist es mit der Quinte. Man öffne oben die Reihe mit 12, unten mit 18 Löchern, man wird eine ganz ruhig fortklingende Quinte hören, solange der obere Windkasten nicht gedreht wird. Das Verhältnis der Schwingungszahlen, gegeben durch die Zahlen der Löcher beider Reihen, ist genau 2:3. Sowie man den Windkasten dreht, hört man Schwebungen. Wir haben oben gesehen, daß je eine Umdrehung der Kurbel die Anzahl der Schwingungen des Tones von 12 Löchern um vier vergrößert oder verkleinert. Wenn wir an der unteren Scheibe ebenfalls den Ton von 12 Löchern erzeugten, erhielten wir vier Schwebungen. Bei der Quinte von 12 und 18 Löchern erhalten wir dagegen bei jeder Umdrehung der Kurbel 12 Schwebungen, weil die Schwingungszahl des dritten Partialtones für je eine Umdrehung der Kurbel um $3.4 = 12$ wächst, wenn die des Grundtones um vier wächst, und wir es hier mit Schwebungen des genannten Partialtones zu tun haben.

Die Sirene hat bei diesen Untersuchungen den großen Vorzug vor allen anderen musikalischen Instrumenten, daß die Stimmung der Intervalle nach den einfachen Zahlenverhältnissen durch ihren Mechanismus selbst in unveränderlicher und fester Weise hergestellt ist, und daß wir deshalb der außerordentlich mühsamen und schwierigen Messungen der Schwingungszahlen überhoben sind, welche dem Beweis unseres Gesetzes vorhergehen müßten, wenn wir andere tönende Instrumente gebrauchen wollten. Das Gesetz war übrigens schon früher durch dergleichen Messungen festgestellt worden, und es hatte sich eine desto genauere Übereinstimmung mit den einfachen Zahlenverhältnissen herausgestellt, je mehr die Methoden, Schwingungszahlen zu messen und rein zu stimmen, vervollkommnet waren.

Wie uns die Koinzidenzen der ersten beiden Obertöne zu den natürlich bestimmten Konsonanzen der Oktave und Quinte geführt haben, können wir eine weitere Reihe natürlich bestimmter konsonanter Intervalle auffinden, indem wir Koinzidenzen der höheren Obertöne hervorbringen. Nur ist zu bemerken, daß in dem Maße, als diese höheren Obertöne schwächer werden, auch die Schwebungen weniger vernehmlich sind, wodurch die verstimmten Intervalle von den rein gestimmten sich unterscheiden. Die Abgrenzung dieser Intervalle, welche auf Koinzidenzen höherer Obertöne beruhen, wird

deshalb für das Ohr immer schwächer und unbestimmter, je höhere Obertöne dazu beitragen. In der folgenden Tabelle enthält die erste Horizontalreihe und die erste Vertikalreihe die Ordnungszahlen der koinzidierenden Partialtöne, und wo die entsprechende vertikale und horizontale Reihe zusammentreffen, ist die Benennung und das Schwingungsverhältnis des entsprechenden Intervalles der Grundtöne angegeben. Das letztere Zahlenverhältnis ist immer unmittelbar gegeben durch die Ordnungszahlen der beiden koinzidierenden Partialtöne.

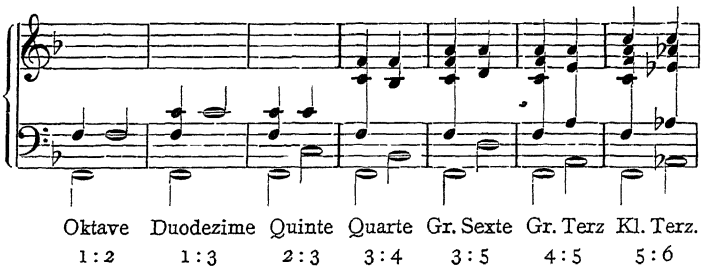
Koinzidierende Partialtöne	1	2	3	4	5
6	2 Oktaven und Quinte 1 : 3	Duodezime 1 : 3	Oktave 1 : 2	Quinte 2 : 3	Kleine Terz 5 : 6
5	2 Oktaven und Terz 4 : 5	Große Dezime 2 : 5	Große Sexte 3 : 5	Große Terz 4 : 5	
4	Doppeloktave 1 : 4	Oktave 1 : 2	Quarte 3 : 4		
3	Duodezime 1 : 3	Quinte 2 : 3			
2	Oktave 1 : 2				

Die beiden untersten Reihen dieser Tafel enthalten die schon besprochenen Intervalle der Oktave, Duodezime und Quinte. In der dritten von unten kommt durch den Ton 4 hinzu das Intervall der Quarte und der Doppeloktave. Durch den Ton 5 bestimmt sich die große Terz teils einfach, teils vermehrt um eine oder zwei Oktaven und die große Sexte. Der sechste Ton bringt noch die kleine Terz hinzu. Ich habe die Tabelle hiermit abgebrochen, weil der siebente Partialton auf denjenigen musikalischen Instrumenten, deren Klangfarbe man innerhalb gewisser Grenzen verändern kann, wie z. B. auf dem Klavier, fortgeschafft oder sehr geschwächt ist. Auch der sechste Ton ist dann meistens sehr schwach, während man bis zum fünften hin die Entstehung der Partialtöne zu begünstigen sucht. Wir werden auf die Intervalle, welche durch die Zahl 7 charakterisiert werden, und auf die kleine Sexte, welche durch die Zahl 8 bestimmt wird, später noch einmal zurückkommen. Die Ordnung der konsonanten Intervalle, anfangend von den entschieden charakterisierten, übergehend zu den

durch schwächere Schwebungen höherer Obertöne weniger gut begrenzten, ergibt sich hiernach folgendermaßen:

1. Oktave 1:2
2. Duodezime 1:3
3. Quinte 2:3
4. Quarte 3:4
5. Große Sexte 3:5
6. Große Terz 4:5
7. Kleine Terz 5:6

Das folgende Notenbeispiel zeigt die Koinzidenzen ihrer Obertöne. Die Grundtöne sind wieder durch halbe Noten, die Obertöne durch Viertelnoten bezeichnet. Die Reihe der Obertöne ist fortgesetzt bis zu dem ersten gemeinsamen Oberton.



Wir haben bisher immer nur von solchen Fällen gesprochen, wo das angegebene Intervall sehr wenig abweicht von einem der natürlichen konsonanten Intervalle. Bei einer geringen Differenz sind in der Tat die Schwebungen langsam, daher leicht zu bemerken und leicht zu zählen. Natürlich sind sie auch vorhanden, wenn die Abweichung der koinzidierenden Obertöne größer wird. Aber freilich, indem sie zahlreicher werden, verbirgt sich ihr eigentlicher Charakter unter der überwiegenden Klangmasse der stärkeren Grundtöne noch leichter, als dies bei den schnelleren Schwebungen dissonanter Grundtöne selbst geschieht. Die schnelleren Schwebungen erscheinen dann wieder als eine Rauhigkeit der ganzen Klangmasse, ohne daß das Ohr so leicht erkennt, worin diese Rauhigkeit ihren Grund hat. Doch lassen sich die Versuche so einrichten, daß man durch allmählich wachsende Verstimmung eines harmonischen Intervalles die Schwebungen allmählich schneller und schneller werden läßt, wobei man

denn alle Zwischenstufen zwischen zählbaren Schwebungen einerseits und der Rauhigkeit einer Dissonanz andererseits verfolgen und sich überzeugen kann, daß beide nur dem Grade nach verschieden sind.

Wir haben bei den Versuchen mit je zwei einfachen Tönen gesehen, daß teils der Abstand derselben in der Skala, teils ihre Anzahl Einfluß hatte auf die Deutlichkeit und die Rauhigkeit ihrer Schwebungen, in der Weise, daß bei den höheren Tönen namentlich die wachsende Zahl der Schwebungen es war, welche selbst bei verhältnismäßig ziemlich engen Intervallen ihre Deutlichkeit beeinträchtigte und sie in der Empfindung verwischte. Hier, wo wir es mit Schwebungen der Obertöne zu tun haben, welche meist dem höheren Teile der Skala angehören, wenn die Grundtöne in den mittleren liegen, hat daher ebenfalls namentlich die Anzahl der Schwebungen einen überwiegenden Einfluß auf ihre Schärfe.

Das Gesetz, welches bei gegebener Verstimmung die Anzahl der Schwebungen eines konsonanten Intervalles bestimmt, ergibt sich leicht aus dem oben angeführten Gesetz für die Schwebungen einfacher Töne. Wenn zwei einander nahe einfache Töne Schwebungen hervorbringen, ist die Anzahl der Schwebungen in der Sekunde gleich der Differenz ihrer Schwingungszahlen. Nehmen wir jetzt als Beispiel an, daß ein Grundton 300 Schwingungen in der Sekunde mache. Zu diesem bestimmen sich nun die Schwingungszahlen der harmonischen Intervalle folgendermaßen:

Grundton: 300			
Höhere Oktave	= 600	Tiefere Oktave	= 150
„ Quinte	= 450	„ Quinte	= 200
„ Quarte	= 400	„ Quarte	= 225
„ große Sexte	= 500	„ große Sexte	= 180
„ große Terz	= 375	„ große Terz	= 240
„ kleine Terz	= 360	„ kleine Terz	= 250

Wenn wir nun annehmen, der Grundton 300 sei verstimmt worden um eine Schwingung, so daß er 301 Schwingungen in der Sekunde mache, so ergibt sich die Zahl der Schwebungen, welche bei den verschiedenen konsonanten Intervallen dadurch entsteht, wenn man

die Schwingungszahlen der koinzidierenden Obertöne berechnet und deren Differenz nimmt, wie folgt:

Intervall nach oben	Schwebende Partialtöne		Zahl der Schwebungen
Prime	1.300 = 300	1.301 = 301	1
Oktave	1.600 = 600	2.301 = 602	2
Quinte	2.450 = 900	3.301 = 903	3
Quarte	3.400 = 1200	4.301 = 1204	4
Große Sexte	3.500 = 1500	5.301 = 1505	5
Große Terz	4.375 = 1500	5.301 = 1505	5
Kleine Terz	5.360 = 1800	6.301 = 1806	6

Intervall nach unten	Schwebende Partialtöne		Zahl der Schwebungen
Prime	1.300 = 300	1.301 = 301	1
Oktave	2.150 = 300	1.301 = 301	1
Quinte	3.200 = 600	2.301 = 602	2
Quarte	4.225 = 900	3.301 = 903	3
Große Sexte	5.180 = 900	3.301 = 903	3
Große Terz	5.240 = 1200	4.301 = 1204	4
Kleine Terz	6.250 = 1500	5.301 = 1505	5

Die Anzahl der Schwebungen, welche bei der Verstimmung eines Tones in einer der angeführten Konsonanzen um eine Schwingung in der Sekunde entsteht, wird also immer gegeben durch die beiden Zahlen, welche das Intervall charakterisieren, und zwar gibt die kleinere Zahl die Zahl der Schwebungen an, welche entstehen, wenn der höhere Ton eine Schwingung mehr macht, die größere Zahl dagegen gehört der Verstimmung des tieferen Tones an. Diese Regel ist allgemein gültig. Nehmen wir also die Sexte *c*—*a*, deren Zahlenverhältnis 3 : 5 ist, und lassen *a* in einer bestimmten Zeit eine Schwingung mehr ausführen, so bekommen wir für dieselbe Zeit drei Schwebungen des Zusammenklanges, und lassen wir *c* in der gleichen Zeit eine Schwingung mehr machen, so erhalten wir fünf Schwebungen usw.

Unsere Berechnung und die darauf gegründete Regel ergeben nun, daß bei gleicher Verstimmung eines Tones die Zahl der Schwebungen der konstanten Intervalle in dem Maße steigt, als diese

Intervalle durch größere Zahlen ausgedrückt werden. Bei den Sexten und Terzen muß man deshalb dem normalen Schwingungsverhältnis sich viel genauer anschließen, wenn man langsame Schwebungen vermeiden will, als bei den Oktaven und den Einklängen. Andererseits aber kommt man auch bei geringer Verstimmung der Terzen viel eher an die Grenze, wo die Schwebungen wegen zu großer Anzahl sich zu verwischen beginnen und ihre Deutlichkeit verlieren. Wenn ich den Einklang $c''-c''$ durch Verstimmung des einen Tones verändere in den Halbton $h'-c''$, so erhalte ich beim Zusammenklang die scharfe Dissonanz von 33 Schwebungen, welche Anzahl, wie ich früher angeführt habe, etwa das Maximum der Rauhigkeit gibt. Will ich die Quinte $f'-c''$ auf 33 Schwebungen verstimmen, so darf ich das c'' nur um $^1/_4$ Ton verändern. Verändere ich es um $^1/_2$ Ton, so daß $f'-c'$ zu $f'-h'$ wird, so erhalte ich 66 Schwebungen, deren Schärfe schon beträchtlich verwischt ist. In der Quinte $c''-g''$ darf ich das c'' sogar nur um $^1/_6$ Tonstufe ändern, wenn ich 33 Schwebungen behalten will, in der Quarte $c''-f''$ um $^1/_8$, in der großen Terz $c''-e''$ und in der Sexte $c''-a''$ um $^1/_{10}$, und in der kleinen Terz $c''-es''$ um $^1/_{12}$ Tonstufe. Umgekehrt, wenn ich in jedem dieser Intervalle das c'' um 33 Schwingungen verändere, so daß es h' oder des'' wird, so erhalte ich folgende Schwingungszahlen:

Das Intervall der	geht über in	oder in	und gibt Schwebungen
Oktave . . . . . $c''-c'''$	$h'-c'''$	$des''-c'''$	66
Quinte . . . . . $c''-g''$	$h'-g''$	$des''-g''$	99
Quarte . . . . . $c''-f''$	$h'-f''$	$des''-f''$	132
Großen Terz . . . $c''-e''$	$h'-e''$	$des''-e''$	165
Kleinen Terz . . . $c''-es''$	$h'-es''$	$des''-es''$	198

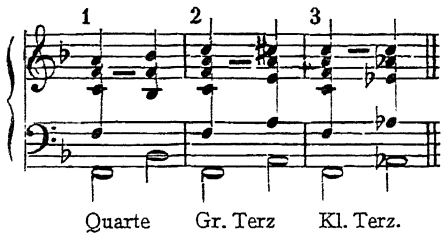
Wenn nun 99 Schwebungen schon unter günstigsten Umständen bei einfachen Tönen sehr schwach wirken, 132 an der Grenze des Wahrnehmbaren zu liegen scheinen, so dürfen wir uns nicht wundern, wenn solche Zahlen von Schwebungen, hervorgebracht durch schwächere Obertöne und überdeckt von den stärkeren Grundtönen, keinen merklichen Eindruck mehr machen und dem Ohr verschwinden. Dieses Verhältnis ist aber für die musikalische Praxis von sehr großer Wichtig-

keit, denn in unserer letzten Tabelle finden wir als verstimmte Quinte vor das Intervall *h'—g''*, welches unter dem Namen der kleinen Sexte als unvollkommene Konsonanz gebraucht wird. Ebenso finden wir als verstimmte Quarte die große Terz *des''—f''*, als verstimmte große Terz die Quarte *h'—e''* vor usw. Daß wenigstens in dieser Gegend der Tonleiter die große Terz nicht die Schwebungen einer verstimmten Quarte, und die Quarte nicht die Schwebungen einer verstimmten großen Terz hören läßt, erklärt sich aus der großen Zahl der Schwebungen. Es klingen vielmehr die genannten Intervalle in der angegebenen Lage vollkommen gleichmäßig abfließend, ohne eine Spur wahrnehmbarer Schwebungen und Rauhigkeiten. wenn sie rein gestimmt sind.

Wir kommen hiermit zur Erörterung derjenigen Umstände, welche auf die Vollkommenheit der Konsonanz in den verschiedenen Intervallen Einfluß haben. Wir haben die Konsonanzen dadurch charakterisiert, daß irgend welche zwei Partialtöne beider Klänge zusammenfallen. Wenn dies geschieht, können die beiden Klänge zusammen keine langsamen Schwebungen ausführen. Wohl aber ist es möglich, daß gleichzeitig irgend welche andere zwei Obertöne beider Klänge einander so nahe kommen, daß sie schnelle Schwebungen miteinander hervorbringen. Fälle dieser Art haben sich schon in den letzten Notenbeispielen gezeigt. Unter den Obertönen der großen Terz *FA* kommen nebeneinander *f'* und *e'* vor, unter denen der kleinen Terz *FAs* die Töne *a'* und *as'*, welche miteinander die Dissonanz eines halben Tones bilden und dieselben Schwebungen hervorrufen müssen, wie wenn die betreffenden Obertöne direkt als einfache Grundtöne angegeben würden. Obgleich nun solche Schwebungen teils wegen ihrer Anzahl, teils wegen der Schwäche der sie hervorbringenden Töne, teils wegen des gleichzeitigen Erklingens der gleichmäßig daneben hertönenden Grundtöne und übrigen Partialtöne keinen sehr hervortretenden Eindruck machen können, so werden sie doch nicht ganz ohne Einfluß auf den Wohlklang des Intervalles sein. Der vorige Abschnitt hat uns gezeigt, daß in gewissen Klangfarben, wo die hohen Obertöne sehr entwickelt sind, selbst innerhalb eines einzigen Klanges Dissonanzen entstehen können, deren Rauhigkeit dem Ohr fühlbar wird. Sobald je zwei Klänge solcher Art zusammenkommen, werden zu den dissonanten Intervallen zwischen den Obertönen jedes

einzelnen Klanges auch noch solche hinzukommen können zwischen je einem Oberton des einen und einem Oberton des zweiten Klanges, wodurch notwendig eine gewisse Vermehrung der Rauhigkeit entstehen muß.

Eine Methode, um für jedes konsonante Intervall diejenigen Obertöne leicht aufzufinden, welche Dissonanzen miteinander bilden, ergibt sich aus dem, was wir über stärkere Verstimmung der konsonanten Intervalle schon beigebracht haben. Wir haben dort die Terz als eine verstimmte Quarte, die Quarte als eine verstimmte Terz auftreten sehen. Wenn wir die Höhe eines Klanges um einen halben Ton verändern, verändern wir auch die Höhe aller seiner Obertöne um einen halben Ton. Diejenigen Obertöne, welche in dem Quartenintervall zusammenfallen, treten um einen Halbton auseinander, wenn wir die Quarte um einen halben Ton verändern, so daß sie große Terz wird, und umgekehrt, diejenigen, welche in der Terz zusammenfallen, müssen um einen Halbton auseinander treten in der Quarte, wie folgendes Beispiel zeigt:



Der vierte und dritte Partialton in der Quarte des ersten Beispieles fallen auf *f'* zusammen. Sinkt die Quarte *B* dagegen im zweiten Beispiel zur großen Terz *A* herab, so sinkt ihr dritter Partialton von *f'* nach *e'* und bildet mit dem liegenbleibenden *f'* des Klanges *F* eine Dissonanz. Dagegen rücken hier zusammen auf *a'* der fünfte und sechste Ton beider Klänge, die im ersten Beispiel die Dissonanz *a'—b'* bildeten. Ebenso verändert sich die Konsonanz *a'—a'* des zweiten Falles in die Dissonanz *a'—as'* des dritten, während die Dissonanz *c''—cis''* des zweiten in die Konsonanz *c''—c''* des dritten übergeht.

In jedem konsonanten Intervall dissonieren also diejenigen Obertöne, welche in den benachbarten Intervallen

zusammenfallen, und man kann in diesem Sinne sagen, daß jede Konsonanz durch die Nähe der in der Tonleiter benachbarten Konsonanzen gestört wird, und zwar um so mehr gestört wird, je niedriger und stärker die Obertöne sind, welche das störende Intervall durch ihre Koinzidenz charakterisieren, oder was dasselbe sagt, je kleinere Zahlen das Schwingungsverhältnis desselben ausdrücken.

Folgende Tabelle gibt nun eine Übersicht dieses Einflusses der verschiedenen Konsonanzen aufeinander. Es sind die Obertöne bis zum neunten aufgenommen und den durch Koinzidenz der höheren Obertöne entstehenden Intervallen entsprechende Namen beigelegt worden. Die dritte Kolumne enthält das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen, welches zugleich die Ordnungszahlen der koinzidierenden Partialtöne angibt. Die vierte Kolumne gibt den Abstand der einzelnen Intervalle voneinander an, und die letzte gibt ein Maß für die relative Stärke der Schwebungen, welche durch Verstimmung des betreffenden Intervalles entstehen, berechnet für die Klangfarbe der Violine[1]). Je größer die hierin enthaltene Zahl ist, desto mehr stört das betreffende Intervall die benachbarten.

Intervalle	Notation	Verhältnis der Schwingungszahlen	Gegenseitiger Abstand	Stärke des Einflusses
Prime	*C*	1 : 1	} 8 : 9	100
Sekunde	*D*	8 : 9	} 63 : 64	1,4
Übermäßige Sekunde . .	*D+*	7 : 8	} 48 : 49	1,8
Verminderte Terz . . .	*Es—*	6 : 7	} 35 : 36	2,4
Kleine Terz	*Es*	5 : 6	} 24 : 25	3,3
Große Terz	*E*	4 : 5	} 35 : 36	5,0
Übermäßige Terz	*E+*	7 : 9	} 27 : 28	1,6
Quarte	*F*	3 : 4	} 20 : 21	8,3
Verminderte Quinte . . .	*Ges—*	5 : 7	} 14 : 15	2,8
Quinte	*G*	2 : 3	} 15 : 16	16,7
Kleine Sexte	*As*	5 : 8	} 24 : 25	2,5
Große Sexte	*A*	3 : 5	} 20 : 21	6,7
Verminderte Septime . .	*B—*	4 : 7	} 35 : 36	3,6
Kleine Septime	*B*	5 : 9	} 9 : 10	2,2
Oktave	*c*	1 : 2		50

[1]) Siehe Beilage XV.

Der vollkommenste Zusammenklang ist der der Prime, oder der Einklang, wo beide Klänge gleiche Tonhöhe haben. Alle ihre Partialtöne fallen zusammen und es kann deshalb keine Dissonanz derselben eintreten, die nicht schon in jedem einzelnen Klang allein enthalten ist.

Ähnlich verhält es sich mit der Oktave. Sämtliche Partialtöne der höheren Note dieses Intervalles fallen mit den geradzahligen Partialtönen der tieferen Note zusammen und verstärken diese, so daß auch in diesem Fall keine Dissonanz der Obertöne entstehen kann, die nicht, wenn auch schwächer, schon in dem tieferen Klang an sich enthalten wäre. Ein Klang, der von seiner Oktave begleitet wird, erhält dadurch eine etwas schärfere Klangfarbe, indem die hohen Partialtöne, welche die Schärfe der Klangfarbe bedingen, durch die hinzugesetzte Oktave zum Teil verstärkt werden; diese Wirkung würde aber in ähnlicher Weise eintreten, wenn man den Grundton des Intervalles einfach an Stärke wachsen ließe, ohne die Oktave hinzuzufügen; nur würde in diesem Fall die Verstärkung auf die verschiedenen Obertöne sich etwas anders verteilen.

Dasselbe gilt von der Duodezime und zweiten Oktave, überhaupt von allen den Fällen, wo der höhere Klang mit einem Oberton des tieferen zusammenfällt, nur daß bei zunehmender Entfernung beider Klänge der Unterschied zwischen Konsonanz und Dissonanz sich immer mehr verwischt.

Die bisher betrachteten Fälle, wo der höhere Klang mit einem der Partialtöne des tieferen zusammenfällt, können wir absolute Konsonanzen nennen. Der zweite Klang bringt hier nichts Neues hinzu, er verstärkt nur einen Teil des ersten Klanges.

Prime und Oktave stören nun die ihnen zunächst liegenden Intervalle beträchtlich, so daß die kleine Sekunde *C—Des* und die große Septime *C—H*, welche um einen Halbton bzw. von der Prime und Oktave abstehen, die schärfsten Dissonanzen unserer Tonleiter sind. Auch die große Sekunde *C—D* und die kleine Septime *C—B*, bei denen die Entfernung von den störenden Intervallen einen ganzen Ton beträgt, muß man zu den Dissonanzen rechnen, doch sind sie wegen des größeren Abstandes der dissonierenden Töne viel milder, als die erstgenannten. Namentlich in den höheren Gegenden der Tonleiter nimmt ihre Rauhigkeit sehr ab, wegen der großen Zahl

ihrer Schwebungen. Da die kleine Septime ihre Dissonanz dem ersten Oberton verdankt, welcher in den meisten musikalischen Klangfarben schwächer ist als der Grundton, so ist ihre Dissonanz noch milder als die der großen Sekunde, und sie steht an der Grenze der Dissonanzen.

Neue gute Konsonanzen müssen wir also in der Mitte des Oktavenintervalles suchen, und hier ist es zunächst die Quinte, welche uns begegnet. Unmittelbar neben sich in der Entfernung eines Halbtones hat sie in unserer letzten Tabelle nur die Intervalle 5:7 und 5:8, welche wenig oder gar nicht stören können, weil bei den besseren musikalischen Klangfarben der siebente und achte Ton sehr schwach ausfallen oder ganz fehlen. Die nächsten Intervalle mit stärkeren Obertönen sind die Quarte 3:4 und die große Sexte 3:5. Indessen hier ist der Abstand ein ganzer Ton, und wenn bei dieser Entfernung schon die Töne 1 und 2 des Oktavenintervalles nur wenig stören in der kleinen Septime, so ist natürlich die Störung durch die Töne 2 und 3 oder durch die Nachbarschaft der Quinte für die Quarte und große Sexte unbedeutend, und ganz zu vernachlässigen ist die Rückwirkung beider Intervalle mit den Tönen 3 und 4 oder 3 und 5 auf die Quinte. So bleibt die Quinte eine vollkommene Konsonanz, in welcher so gut wie gar keine Störung durch Dissonanzen eng zusammenliegender Obertöne merklich wird; nur bei scharfen Klangfarben (Harmonium, Kontrabaß, Violoncell, Zungenregister der Orgel) mit hohen Obertönen und in sehr tiefer Lage, wenn die Zahl der Schwebungen gering ist, bemerkt man, daß die Quinte etwas rauher klingt, als die Oktave. Daher ist die Quinte auch seit ältester Zeit und bei allen Musikern als Konsonanz anerkannt worden. Dagegen sind die der Quinte zunächst benachbarten Intervalle diejenigen, welche nächst den der Oktave benachbarten die schärfsten Dissonanzen bilden, und zwar die zwischen Quinte und Quarte liegenden, die von der einen Seite durch die Töne 2 und 3, von der anderen durch die Töne 3 und 4 gestört werden, noch entschiedener als diejenigen, welche zwischen Quinte und großer Sexte liegen, weil bei den letzteren statt der Störung durch den Ton 4 die durch den schwächeren Ton 5 eintritt. Die zwischen Quinte und Quarte liegenden Intervalle werden deshalb in der musikalischen Praxis stets als Dissonanzen betrachtet; zwischen Quinte und großer Sexte liegt dagegen das Intervall der

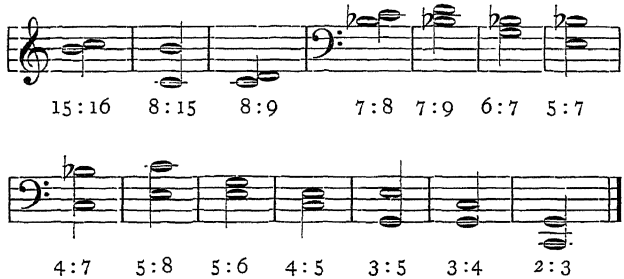
kleinen Sexte, welches als unvollkommene Konsonanz behandelt wird und diesen Vorzug weniger seinem Wohlklang verdankt, als dem Umstand, daß es die Umkehrung der großen Terz ist, wie denn auch auf den Tastaturinstrumenten je nach der Tonart derselbe Anschlag bald die Konsonanz *C — As*, bald die Dissonanz *C — Gis* repräsentieren muß.

Auf die Quinte folgen zunächst die Konsonanzen der Quarte 3·4 und großen Sexte 3:5, deren Hauptstörung von der Quinte auszugehen pflegt. Die Quarte liegt der Quinte etwas ferner (Abstand gleich dem Intervall 8:9) als die Sexte (Abstand 9:10), daher letztere eine unvollkommenere Konsonanz als die Quarte ist. Doch hat diese die große Terz mit den koinzidierenden Obertönen 4 und 5 dicht neben sich, und wenn die Obertöne 4 und 5 stark entwickelt sind, kann deshalb jener Vorteil der Quarte wieder aufgehoben werden. Auch ist bekannt, daß ein langer Streit über die Natur der Quarte, ob sie Konsonanz oder Dissonanz sei, von den älteren theoretischen Musikern geführt worden ist. Die bevorzugte Stellung, welche der Quarte neben der großen Sexte und großen Terz gegeben wird, verdankt sie mehr dem Umstand, daß sie die Umkehrung der Quinte ist, als ihrem hervorstechenden Wohlklang. Die Quarte sowohl wie die große und kleine Sexte verschlechtern sich, wenn sie um eine Oktave erweitert werden, weil sie dann in die Nähe der Duodezime zu liegen kommen und daher sowohl die Störung durch die charakteristischen Töne der Duodezime 1 und 3 stärker wird, als durch die nebenliegenden Intervalle 2:5 und 2:7, welche mehr stören als 4:5 und 4:7 in der unteren Oktave.

Alsdann folgen in der Reihe der Konsonanzen die große und die kleine Terz. Die letztere ist in solchen Fällen, wo der sechste Ton des Klanges schwach entwickelt ist, wie auf den neueren Pianofortes, nur noch sehr unvollkommen abgegrenzt, da ihre Verstimmung kaum noch deutlich wahrnehmbare Schwebungen hervorruft. Die kleine Terz ist der Störung durch den Grundton noch merklich ausgesetzt, die große Terz der Störung durch die Quarte; beide stören sich außerdem gegenseitig, wobei die kleine Terz schlechter wegkommt als die große. Für den Wohlklang beider Intervalle ist es daher wesentlich, daß die Zahl der Schwebungen, durch welche ihr Wohlklang verunreinigt wird, groß sei. In höheren Teilen der

Tonleiter klingen sie vollkommen rein und gut, in niederen dagegen rauh. Das ganze Altertum hat sich daher geweigert, die Terzen als Konsonanzen anzuerkennen, erst seit der Zeit Francos von Cöln (Ende des 12. Jahrhunderts) begann man sie als unvollkommene Konsonanzen zuzulassen. Der Grund hiervon mag darin zu suchen sein, daß die Theorie der Musik bei den klassischen Völkern und im Mittelalter sich hauptsächlich am Gesang der Männerstimmen entwickelt hat und in so tiefer Lage die Terzen in der Tat nicht besonders gut klingen. Damit hängt es denn wohl zusammen, daß man auch die richtige Stimmung der Terzen nicht fand, und die sogenannte pythagoreische Terz 64:81 bis gegen das Ende des Mittelalters als die normale betrachtet wurde.

Ich habe oben schon hervorgehoben, welchen wichtigen Einfluß auf den Wohlklang der Konsonanzen, namentlich der unvollkommeneren, die Anzahl der schwachen Schwebungen der dissonanten Obertöne hat. Wenn wir die Intervalle alle über denselben Grundton legen, so ist die Zahl ihrer Schwebungen sehr verschieden, bei den unvollkommenen viel größer, als bei den vollkommenen. Wir können aber allen von uns bisher aufgeführten Intervallen eine solche Lage in der Tonleiter geben, daß die Anzahl der Schwebungen gleich groß ist. Da wir für einfache Töne gefunden haben, daß 33 Schwebungen in der Sekunde etwa das Maximum der Rauhigkeit geben, so habe ich in dem hier folgenden Notenbeispiel die Intervalle in der Lage zusammengestellt, wo sie 33 Schwebungen geben. Es ist die Stimmung der reinen *C-Dur*-Tonleiter vorausgesetzt. Der Ton *b* soll die verminderte Septime von *c* (4:7) bedeuten.



Die Töne dieses Beispieles sind alle Obertöne des C_1 von 33 Schwingungen, also ihre eigenen Schwingungszahlen und die ihrer

Obertöne alle gleich der Zahl 33 multipliziert mit ganzen Zahlen; die Differenzen dieser Schwingungszahlen, welche die Zahlen der Schwebungen angeben, müssen daher selbst immer wieder 33, 66 oder ein höheres Multiplum von 33 sein.

In der hier angegebenen niedrigen Lage sind nun die von dissonanten Obertönen herrührenden Schwebungen so wirksam, als sie ihrer Intensität nach sein können, und hier sind die Sexten, Terzen und selbst die Quarte ziemlich rauh; doch zeigen die große Sexte und große Terz ihre Überlegenheit über die kleine Terz und kleine Sexte darin, daß sie etwas weiter in der Skala herabsteigen und doch noch etwas weicher klingen als jene. Es ist auch eine allgemein bekannte praktische Regel der Musiker, daß sie in tiefer Lage diese engen Intervalle vermeiden, wenn sie weich klingende Akkorde haben wollen, eine Regel, für welche in den bisherigen theoretischen Darstellungen der Akkordlehre die Rechtfertigung fehlte.

Die von mir hingestellte Theorie des Hörens mittels der mitschwingenden elastischen Nervenanhänge würde erlauben, die Intensität der Schwebungen verschiedener Intervalle zu berechnen, wenn die Intensität der Obertöne in der betreffenden Klangfarbe des gebrauchten Instrumentes gegeben ist und man die Intervalle so legt, daß die Anzahl ihrer Schwebungen die gleiche ist. Doch fällt eine solche Berechnung je nach den verschiedenen Klangfarben sehr verschieden aus und hat nur Wert für den einzelnen Fall.

Für Intervalle, welche über demselben Grundton aufgebaut sind, kommt nun noch ein neuer Faktor hinzu, nämlich die Zahl der Schwebungen, deren Einfluß auf die Rauhigkeit der Empfindung sich noch nicht direkt durch ein feststehendes Gesetz ausdrücken läßt. Um aber eine übersichtliche graphische Darstellung der hier zusammenwirkenden verwickelten Verhältnisse geben zu können, welche in einem solchen Fall in einem Überblick mehr lehrt, als die kompliziertesten Beschreibungen, habe ich eine solche Berechnung durchgeführt und danach die Fig. 60 a und b konstruiert. Um sie durchführen zu können, mußte ich allerdings für die Abhängigkeit der Rauhigkeit von der Anzahl der Schwebungen ein einigermaßen willkürliches Gesetz annehmen. Ich wählte dazu die einfachste mathematische Formel, welche ausdrückt, daß die Rauhigkeit verschwindet, wenn die Anzahl der Schwebungen gleich Null ist, daß sie ein

Maximum wird für 33 Schwebungen, und dann bei steigender Anzahl derselben wieder abnimmt. Dann habe ich für die Klangfarbe der Violine die Intensität und Rauhigkeit der Schwebungen berechnet, welche die einzelnen Obertöne paarweise zusammengenommen geben, und nach den Resultaten schließlich die Fig. 60 a und b konstruiert. Die Grundlinien $c' c''$ und $c'' c'''$ bedeuten das zwischen den gleichnamigen Noten gelegene Stück der musikalischen Skala, aber so

Fig. 60 a.

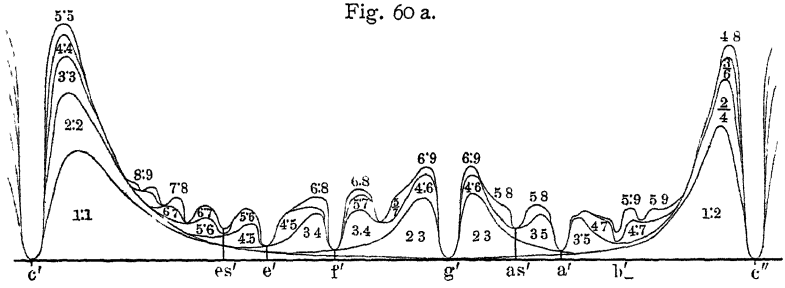
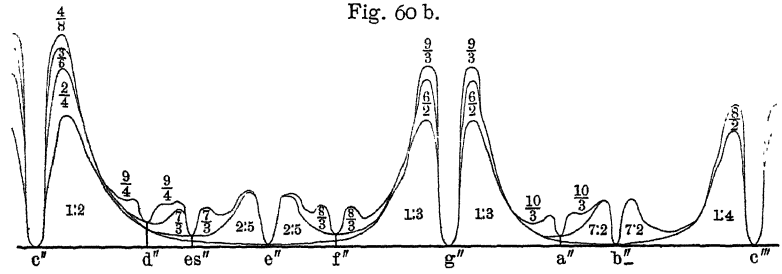


Fig. 60 b.



genommen, daß die Tonhöhe kontinuierlich darin steigt, nicht stufenweise. Es ist ferner angenommen, daß die den einzelnen Punkten der Skala entsprechenden Klänge zusammenklingen mit dem Ton c', der den konstanten Grundton aller Intervalle bildet. Fig. 60 a zeigt also die Rauhigkeit der Intervalle, welche kleiner sind als eine Oktave, Fig. 60 b die derjenigen, welche weiter als eine, enger als zwei Oktaven sind. Über den horizontalen Grundlinien sind Hügel aufgetragen, mit den Ordnungszahlen je zweier Obertöne bezeichnet. Die Höhe dieser Hügel an jeder Stelle ihrer Breite ist gleich gemacht der Rauhigkeit, welche die durch die Ziffern angegebenen beiden Obertöne hervorbringen, wenn der Klang von entsprechender Tonhöhe zusammen mit dem c' erklingt. Die Rauhigkeiten, welche die ver-

schiedenen Obertöne hervorbringen, sind übereinander getürmt. Man sieht, wie die verschiedenen Rauhigkeiten, die von den verschiedenen Obertönen herrühren, übereinander greifen, und daß nur wenige schmale Täler übrig bleiben, entsprechend dem Ort der vorzüglichsten Konsonanzen, in denen die Rauhigkeit des Zusammenklanges verhältnismäßig klein wird. Die tiefsten Täler gehören in der ersten Oktave $c'c''$ der Oktave c'' und Quinte g' an, darauf folgt die Quarte f', die große Sexte a', die große Terz e' in der Ordnung, wie wir schon vorher diese Intervalle gefunden haben. Die kleine Terz es' und kleine Sexte as' zeigen schon höher liegende Talsohlen, entsprechend der größeren Rauhigkeit dieser Intervalle. Ihnen sehr nahe stehen die mit der 7 gebildeten Intervalle 4:7, 5:7, 6:7.

In der zweiten Oktave verbessern sich im allgemeinen diejenigen Intervalle der ersten Oktave, in deren Zahlenausdruck die kleinere Zahl eine gerade ist; nämlich die Duodezime 1:3, die Dezime 2:5, die verminderte Septime 2:7 und die verminderte Terz 3:7 sind reiner als die Quinte 2:3, als die große Terz 4:5 und die Intervalle 4:7 und 6:7. Die anderen Intervalle sind relativ verschlechtert. Die Undezime oder erweiterte Quarte tritt entschieden zurück gegen die Dezime, die Tredezime oder erweiterte große Sexte, ebenso gegen die verminderte Septime; noch ungünstiger stellen sich die kleine Terz und kleine Sexte bei ihrer Erweiterung um eine Oktave wegen der verstärkten Störung durch die Nebenintervalle. Diese hier aus der Berechnung sich ergebenden Folgerungen bestätigen sich leicht beim Versuch an rein gestimmten Instrumenten; daß sie auch in der musikalischen Praxis berücksichtigt werden, trotzdem nach der gewöhnlichen musikalischen Theorie die Natur eines Akkordes als unverändert betrachtet wird, wenn man einzelne seiner Töne um ganze Oktaven verlegt, werden wir später bei der Lehre von den Akkorden und ihren Umlagerungen sehen.

Daß besondere Beschaffenheit einzelner Klangfarben die Reihenfolge des Wohlklanges der Intervalle mannigfach verändern kann, ist schon erwähnt worden. Die Klangfarbe der jetzt gebräuchlichen musikalischen Instrumente ist natürlich ausgesucht und verändert worden mit Rücksicht auf ihre Brauchbarkeit zu harmonischen Verbindungen. Die Untersuchung der Klangfarben unserer Hauptinstrumente hat gezeigt, daß wir für eine gute musikalische Klangfarbe es

lieben, wenn die Oktave und Duodezime des Grundtones kräftig, der vierte und fünfte Ton mäßig mitklingen, die höheren Obertöne aber schnell an Stärke abnehmen. Eine solche Klangfarbe vorausgesetzt, können wir die Resultate des vorliegenden Abschnittes wie folgt zusammenfassen:

Wenn zwei musikalische Klänge nebeneinander erklingen, ergeben sich im allgemeinen Störungen ihres Zusammenklingens durch die Schwebungen, welche ihre Partialtöne miteinander hervorbringen, so daß ein größerer oder kleinerer Teil der Klangmasse in getrennte Tonstöße zerfällt und der Zusammenklang rauh wird. Wir nennen dies Verhältnis Dissonanz.

Es gibt aber gewisse bestimmte Verhältnisse zwischen den Schwingungszahlen, bei denen eine Ausnahme von dieser Regel eintritt, wo entweder gar keine Schwebungen sich bilden, oder diese Schwebungen so schwach in das Ohr fallen, daß sie keine unangenehme Störung des Zusammenklanges veranlassen; wir nennen diese Ausnahmefälle Konsonanzen.

1. Die vollkommensten Konsonanzen sind diejenigen, welche wir absolute Konsonanzen genannt haben, bei denen der Grundton des einen Klanges mit einem Partialton des anderen Klanges zusammenfällt. Dahin gehören die Oktave, Duodezime, Doppeloktave.

2. Demnächst folgen die Quinte und die Quarte, welche wir vollkommene Konsonanzen nennen können, weil sie in jedem Teile der Tonleiter ohne erhebliche Störung des Wohlklanges gebraucht werden können. Die Quarte ist von beiden die unvollkommenere Konsonanz, sie nähert sich den Konsonanzen der folgenden Gruppe, und erhält ihren Vorzug in der musikalischen Praxis wesentlich nur dadurch, daß sie in der Akkordbildung die Ergänzung der Quinte zur Oktave bildet, worauf wir in einem späteren Abschnitt zurückkommen werden.

3. Die folgende Gruppe wird gebildet von der großen Sexte und großen Terz, welche wir mittlere Konsonanzen nennen können. Den alten Harmonikern galten sie nur als unvollkommene Konsonanzen. Die Störung des Wohlklanges ist in tiefen Lagen schon sehr merklich, in hohen Lagen verschwindet sie, weil die Schwebungen durch ihre große Zahl sich verwischen. Beide sind bei guten musi-

kalischen Klangfarben aber noch selbständig charakterisiert, indem jede kleine Verstimmung derselben deutliche Schwebungen der Obertöne hervorruft, und so sind beide Intervalle von allen benachbarten scharf geschieden.

4. Die unvollkommenen Konsonanzen der kleinen Terz und kleinen Sexte sind meist nicht mehr selbständig bestimmt, weil die sie begrenzenden Obertöne in guten Klangfarben für die Terz oft, für die Sexte gewöhnlich fehlen, und deshalb kleine Verstimmungen dieser Intervalle nicht notwendig Schwebungen hervorbringen. Sie sind noch weniger in tiefen Lagen anwendbar als die vorigen und verdanken ihren Vorzug als Konsonanzen vor manchen anderen Intervallen, die auf der Grenze zwischen Konsonanzen und Dissonanzen stehen, wesentlich dem Umstand, daß sie notwendig sind in der Akkordbildung als Ergänzungen der großen Sexte und Terz zur Oktave oder Quinte. An Wohlklang ist die verminderte Septime 4:7 sehr häufig der kleinen Sexte überlegen, nämlich immer dann, wenn der dritte Partialton des Klanges, verglichen mit dem zweiten, verhältnismäßig stark ist, wobei dann die Quinte auf die um einen halben Ton von ihr entfernten Intervalle stärker störend einwirkt, als die Oktave auf die von ihr um einen ganzen Ton entfernte kleine Septime. Diese verminderte Septime aber mit anderen Konsonanzen zu Akkorden verbunden, bringt lauter schlechtere Intervalle hervor, als sie selbst ist, 6:7, 5:7, 7:8 usw., und wird deshalb in der heutigen Musik nicht als Konsonanz gebraucht.

5. Bei der Erweiterung der Intervalle um eine Oktave verbessern sich unter den genannten Intervallen die Quinte und große Terz als Duodezime und große Dezime. Schlechter werden Quarte und große Sexte als Undezime und Tredezime, am schlechtesten die kleine Terz und Sexte als kleine Dezime und Tredezime, so daß die letztgenannten bei weitem durch die Intervalle 2:7 und 3:7 an Wohlklang übertroffen werden.

Die hier aufgestellte Reihenfolge der Konsonanzen berücksichtigt nur den Wohlklang jedes einzelnen Intervalles, wenn dasselbe an und für sich ohne Verbindung mit anderen angegeben wird; es sind dabei alle Beziehungen auf Tonart, Tonleiter und Modulationen unberücksichtigt geblieben. Fast alle musikalischen Theoretiker haben dergleichen Reihenfolgen für die Konsonanzen aufgestellt, die auch in

ihren Hauptzügen untereinander und mit der von uns aus der Theorie der Schwebungen hergeleiteten gut übereinstimmen. Namentlich wird von allen der Einklang und die Oktave vorangestellt, als die vollkommensten aller Konsonanzen; demnächst folgt die Quinte ebenfalls bei allen, die Quarte bei denjenigen wenigstens, welche die modulatorischen Eigenschaften der Quarte nicht mit hineingezogen und sich auf die Beobachtung des Wohlklanges des isolierten Intervalles beschränkt haben. In der Anordnung der Sexten und Terzen dagegen herrscht große Verschiedenheit. Bei den Griechen und Römern wurden diese Intervalle überhaupt nicht als Konsonanzen anerkannt, vielleicht weil in der ungestrichenen Oktave, wo sich ihre überwiegend für Männerstimmen berechneten Gesänge bewegten, diese Intervalle in der Tat schlecht klingen, vielleicht weil ihr Ohr überhaupt zu empfindlich war, um auch nur die schwache Zunahme der Rauhigkeit zu ertragen, welche zusammengesetzte Klänge geben, wenn sie in Terzen und Sexten zusammenklingen. Noch in gegenwärtiger Zeit, versichert der Erzbischof Chrysanthus von Dyrrhachium, hätten die Neugriechen kein Gefallen an mehrstimmiger Musik, weshalb er es verschmäht, in seinem Buche über Musik überhaupt sich darauf einzulassen, und die, welche aus Neugierde etwa diese Regeln kennen lernen wollten, auf die abendländischen Schriften verweist[1]). Ähnlich denken auch die Araber nach den Berichten aller Reisenden.

Diese Regel blieb bestehen auch während der ersten Hälfte des Mittelalters, als man schon anfing, die ersten Versuche mit zweistimmigen Sätzen zu machen. Erst gegen das Ende des 12. Jahrhunderts nahm Franco von Cöln die Terzen unter die Konsonanzen auf. Er unterscheidet:

1. Vollkommene Konsonanzen: Einklang und Oktave.
2. Mittlere Konsonanzen: Quinte und Quarte.
3. Unvollkommene Konsonanzen: Große und kleine Terz.
4. Unvollkommene Dissonanzen: Große und kleine Sexte.
5. Vollkommene Dissonanzen: Kleine Sekunde, übermäßige Quarte, große und kleine Septime[2]).

[1]) *Θεωρητικὸν μέγα τῆς Μουσικῆς παρὰ Χρυσάνθου. Τεργέστῃ* 1832. Zitiert bei Coussemaker, Histoire de l'Harmonie. Paris 1852, p. 5.

[2]) Gerbert, Scriptores ecclesiastici de musica sacra. Saint-Blaise 1784, T. III, p. 11. — Coussemaker, Histoire de l'Harmonie, p. 49.

Erst im 13. und 14. Jahrhundert fing man an, auch die Sexten unter die Konsonanzen zu setzen. Philipp de Vitry und Jean de Muris[1]) führen als vollkommene Konsonanzen auf den Einklang, die Oktave und Quinte, als unvollkommene die Terzen und Sexten. Die Quarte ist gestrichen. Übrigens werden von dem ersteren Schriftsteller die große Terz und die große Sexte, als die vollkommeneren, den kleinen Intervallen gleichen Namens gegenübergestellt. Dieselbe Ordnung findet sich im Dodecachordon des Glareanus 1557, der nur noch die um eine Oktave erweiterten Intervalle hinzufügt. Daß man die Quarte sowohl aus den vollkommenen wie aus den unvollkommenen Konsonanzen strich, hatte wohl seinen Grund in den Regeln über die Stimmführung. Vollkommene Konsonanzen durften nicht in denselben Stimmen aufeinander folgen, Dissonanzen ebensowenig, wohl aber unvollkommene Konsonanzen, wie die Terzen und Sexten. Andererseits aber konnten die vollkommenen Konsonanzen, Oktaven und Quinten in solchen Akkorden, welche Ruhepunkte bilden sollten, namentlich im Schlußakkord, vorkommen. Da paßte aber die Quarte des Grundtones dieses Akkordes nicht hin, weil sie nicht in dessen Dreiklang liegt. Andererseits ließ man eine Folge von Quarten in zwei Stimmen auch nicht zu; dazu stand die Quarte der Quinte zu nahe. Also teilte die Quarte in bezug auf die Stimmführung die Eigenschaften der Dissonanzen, und man setzte sie kurzweg unter die Dissonanzen, während es passender gewesen wäre, für sie eine Mittelstufe zwischen den vollkommenen und unvollkommenen Konsonanzen einzuschieben. Denn was den Wohlklang betrifft, kann kein Zweifel sein, daß bei den meisten Klangfarben die Quarte den großen Terzen und Sexten an Wohlklang überlegen ist, jedenfalls aber der kleinen Terz und Sexte. Die um eine Oktave vergrößerte Quarte, die Undezime, klingt aber bei einigermaßen starkem dritten Teilton ziemlich schlecht.

Der Streit über Konsonanz oder Dissonanz der Quarte zieht sich bis in die neueste Zeit hinein. Noch in der 1840 erschienenen Harmonielehre von Dehn wird die Behauptung festgehalten, sie sei als Dissonanz zu behandeln und aufzulösen; aber freilich schiebt Dehn der Streitfrage einen ganz anderen Sinn unter, indem er die

[1]) Coussemaker, l. c. p. 66 u. 68.

Quarte jedes Grundtones innerhalb seiner Tonart und unabhängig von den mitklingenden Intervallen als Dissonanz zu behandeln vorschreibt. Sonst ist es in der neueren Musik ja fortwährend gebräuchlich, die Verdoppelung des Grundtones als Quarte der Dominante mit dieser zusammen auch in den Schlußakkorden vorkommen zu lassen, und sie ist in diesen Akkorden sogar schon längst gebraucht worden, ehe man noch Terzen dort anzuwenden wagte, so daß sie dadurch praktisch längst als eine der besseren Konsonanzen anerkannt ist.

Elfter Abschnitt.

Die Schwebungen der Kombinationstöne.

Außer den harmonischen Obertönen können auch die Kombinationstöne Schwebungen erzeugen, wenn zwei oder mehrere Klänge gleichzeitig erklingen. Es ist in dem siebenten Abschnitt auseinander gesetzt worden, daß der stärkste Kombinationston zweier Töne derjenige ist, dessen Schwingungszahl der Differenz der Schwingungszahlen jener beiden Töne entspricht, oder der Differenzton erster Ordnung. Dieser ist es denn auch, welcher hauptsächlich für die Erzeugung von Schwebungen in Betracht kommt. Schon dieser stärkste Kombinationston ist ziemlich schwach, wenn nicht die primären Töne beträchtliche Stärke haben; noch mehr sind es die Kombinationstöne höherer Ordnung und die Summationstöne. Schwebungen, durch diese schwachen Töne erzeugt, können nur beobachtet werden, wenn alle anderen Schwebungen, welche die Beobachtung stören könnten, fehlen, also namentlich bei den Zusammenklängen zweier von Obertönen ganz freien einfachen Töne; dagegen die Schwebungen der ersten Differenztöne sehr gut auch neben den Schwebungen der harmonischen Obertöne zusammengesetzter Klänge gehört werden, sobald man überhaupt nur geübt ist, die Kombinationstöne zu hören.

Die Differenztöne erster Ordnung für sich allein und ohne Verbindung mit den Kombinationstönen höherer Ordnung können Schwebungen veranlassen: 1. wenn zwei mit Obertönen versehene Klänge zusammenkommen; 2. wenn drei oder mehrere einfache oder zusammengesetzte Töne zusammenkommen. Dagegen kommen die Kombinationstöne höherer Ordnung in solchen Fällen als Ursache von Schwebungen in Betracht, wo nur zwei einfache Töne zusammenklingen.

Wir beginnen mit den ersten Differenztönen zusammengesetzter Klänge. So gut wie ihre Grundtöne Kombinationstöne geben, gibt auch jedes beliebige Paar von Obertönen der beiden Klänge Kombinationstöne. Natürlich nehmen letztere rasch an Stärke ab, im Verhältnis wie die Obertöne schwächer werden. Wenn von diesen Kombinationstönen einer oder einige mit anderen Kombinationstönen oder den primären Grundtönen oder Obertönen zusammenfallen, entstehen Schwebungen. Nehmen wir als Beispiel eine etwas unrein gestimmte Quinte, deren Schwingungszahlen 200 und 301 sein mögen, statt 200 und 300, wie sie einer reinen Quinte zukommen würden. Wir berechnen die Schwingungszahlen der Obertöne, indem wir die der Grundtöne mit 1, 2, 3 usw. multiplizieren. Die Schwingungszahlen der ersten Differenztöne finden wir, indem wir je zwei dieser Zahlen voneinander subtrahieren. Die folgende Tabelle enthält in der ersten Horizontal- und Vertikalreihe die einzelnen Teiltöne beider Klänge, in dem beiden entsprechenden Mittelfeld die Differenz ihrer Schwingungszahlen, die der Schwingungszahl des Kombinationstones entspricht.

		Teiltöne der Quinte			
		301	602	903	
Teiltöne des Grundtones	200	101	402	703	Kombinationstöne
	400	99	202	503	
	600	299	2	303	
	800	499	198	103	
	1000	699	398	97	

Ordnen wir die Töne nach der Höhe, so finden wir folgende Gruppen:

2 97 198 299 398 600 699
99 200 301 400 602 703
101 202 303 402
103

Die Zahl 2 ist zu klein, um einem Kombinationston zu entsprechen, sie zeigt nur die Zahl der Schwebungen zwischen den beiden Obertönen 600 und 602 an. In allen den übrigen Gruppen stehen dagegen Töne zusammen, deren Schwingungszahlen um 2, 4 oder 6 voneinander unterschieden sind, die also bzw. zwei, vier

oder sechs Schwebungen geben in derselben Zeit, wo die genannten beiden Obertöne zwei Schwebungen machen. Die stärksten unter den Kombinationstönen sind die beiden Töne 101 und 99, welche gleichzeitig durch ihre tiefe Lage von den übrigen Tönen sich leichter scheiden.

Wir bemerken an unserem Beispiel, daß die langsamsten Schwebungen, welche durch die Kombinationstöne entstehen, an Zahl denen gleich sind, welche durch die Obertöne entstehen. Es ist dies eine allgemeine Regel, welche für alle Intervalle zutrifft.

Ferner ist leicht einzusehen, daß, wenn wir in unserem Beispiel statt der Zahlen 200 und 301 die der reinen Quinte entsprechenden Zahlen 200 und 300 gesetzt hätten, alle Zahlen unserer Tabelle sich auf Vielfache von 100 reduziert haben würden, und somit auch alle die verschiedenen Kombinationstöne und Obertöne, welche dort Schwebungen gaben, im letzteren Falle genau zusammengefallen wären, ohne Schwebungen zu geben. Was sich in diesem unserem Beispiel für die Quinte gezeigt hat, gilt allgemein auch für alle anderen harmonischen Intervalle [1]).

Die ersten Differenztöne zusammengesetzter Klänge geben immer nur dann Schwebungen, und auch immer nur ebensoviel Schwebungen, wenn und wie es die Obertöne derselben Klänge tun würden, vorausgesetzt, daß deren Reihe vollständig vorhanden ist. Daraus folgt, daß an den Resultaten, die wir im vorigen Kapitel aus der Untersuchung über die Schwebungen der Obertöne gewonnen haben, durch das Hinzukommen der Kombinationstöne nichts wesentlich verändert wird. Nur die Stärke der Schwebungen wird etwas vergrößert werden können.

Wesentlich anders verhält es sich dagegen beim Zusammenklingen zweier einfacher Töne, welche von Obertönen ganz frei sind. Wenn wir die Kombinationstöne nicht mit in Rechnung ziehen, würden zwei einfache Töne, wie die zweier Stimmgabeln oder zweier gedackter Orgelpfeifen, Schwebungen nur geben können, wenn sie ziemlich nahe beieinander liegen. Kräftig sind diese Schwebungen, wenn ihr Intervall eine kleine oder große Sekunde beträgt, schwach und nur in den tieferen Teilen der Skala wahrnehmbar, wenn es

[1]) Den mathematischen Beweis dafür in Beilage XVI.

einer Terz nahe kommt, und sie nehmen allmählich in dem Maße an Deutlichkeit ab, als das Intervall wächst, ohne daß besondere harmonische Intervalle besonders hervortretende Eigenschaften zeigten. Bei jedem größeren Intervall zwischen zwei einfachen Tönen würden die Schwebungen ganz fehlen, wenn Obertöne und Kombinationstöne ganz fehlten, und es würden also dann auch die im vorigen Abschnitt aufgefundenen konsonierenden Intervalle bei solchen Tönen vor ihren Nachbarintervallen durch nichts ausgezeichnet sein; es würden also überhaupt größere konsonierende und dissonierende Intervalle dann gar nicht unterschieden sein.

Daß nun doch auch weitere Intervalle einfacher Töne Schwebungen geben können, wenn auch sehr viel schwächere, als die bisher betrachteten, und daß sich demgemäß auch für solche Töne Konsonanzen und Dissonanzen scheiden, wenn auch sehr viel unvollkommener als für zusammengesetzte Töne, beruht, wie Scheibler gezeigt hat, auf den Kombinationstönen höherer Ordnung.

Nur bei der Oktave genügt der erste Differenzton. Wenn der Grundton 100 Schwingungen macht, während die Oktave in gleicher Zeit 201 macht, so macht der erste Differenzton $201 - 100 = 101$ Schwingungen und fällt also nahehin mit dem Grundton 100 zusammen, mit dem er eine Schwebung auf 100 Schwingungen hervorbringt. Diese Schwebungen sind ohne Schwierigkeit zu hören, und man kann deshalb auch bei einfachen Tönen die reine Oktave leicht von der unreinen durch die Schwebungen unterscheiden.

Bei der Quinte genügt der Kombinationston erster Ordnung nicht mehr. Nehmen wir für eine unreine Quinte das Schwingungsverhältnis 200 zu 301, so ist der Kombinationston erster Ordnung 101, der zu weit von den beiden primären Tönen abliegt, um mit ihnen Schwebungen zu geben. Er bildet aber mit dem Ton 200 eine unreine Oktave, und eine solche gibt, wie wir oben gesehen haben, Schwebungen. Diese kommen hier zustande, indem der Ton 101 mit dem Ton 200 einen neuen Kombinationston 99 bildet, der mit dem Ton 101 nun zwei Schwebungen gibt. Durch diese Schwebungen unterscheidet sich also wieder die unreine Quinte zweier einfachen Töne von der reinen Quinte, und die Anzahl dieser Schwebungen ist wieder ebenso groß, als wären die Schwebungen durch Obertöne hervorgebracht. Um diese Schwebungen zu beobachten, müssen aber die

beiden primären Töne ziemlich stark sein, und es darf kein störendes fremdes Geräusch bestehen. Beobachtet man aber unter günstigen Bedingungen, so ist es nicht schwer, sie zu hören.

Bei der unreinen Quarte, deren Schwingungszahlen 300 zu 401 sein mögen, ist der erste Kombinationston 101; dieser gibt mit dem Ton 300 den Kombinationston zweiter Ordnung 199, und dieser mit dem Ton 401 die Differenz 202 als Kombinationston dritter Ordnung, welcher mit dem zweiter Ordnung 199 drei Schwebungen macht, ebensoviel, als durch die Obertöne 1200 und 1203 der beiden primären Töne erzeugt worden wären, wenn diese existierten. Diese Schwebungen der Quarte sind nun schon sehr schwach, auch bei starken primären Tönen. Zu ihrer Beobachtung muß man ganz ungestört sein und große Aufmerksamkeit anwenden, und dabei bleibt dann doch immer noch der Zweifel bestehen, ob bei der starken Erregung der primären Töne nicht schwache Obertöne entstehen, wie schon auf S. 94 und 263 erörtert ist.

Kaum noch wahrzunehmen, auch unter den günstigsten Bedingungen, sind die Schwebungen der unreinen großen Terz. Nehmen wir die Schwingungszahlen der primären Töne 400 und 501, so ist

501 — 400	= 101	Kombinationston	erster Ordnung
400 — 101	= 299	„	zweiter „
501 — 299	= 202	„	dritter „
400 — 202	= 198	„	vierter „

Die Töne 202 und 198 geben vier Schwebungen. Scheibler hat diese Schwebungen der unreinen großen Terz noch gezählt, ich selbst habe sie unter günstigsten Bedingungen auch wohl noch zu hören geglaubt, aber jedenfalls sind sie so schwer wahrzunehmen, daß sie bei der Bestimmung des Unterschiedes von Konsonanzen und Dissonanzen nicht mehr in das Gewicht fallen können.

Daraus folgt also, daß die verschiedenen Intervalle, die der Terz benachbart sind, durch den Zusammenklang zweier einfachen Töne gleichmäßig hergestellt werden können, ohne daß ein Unterschied des Wohlklanges stattfände, wenn sie nicht einerseits der Sekunde oder andererseits der Quarte sich zu sehr nähern. Und ich muß nach meinen Versuchen an gedackten Orgelpfeifen behaupten, so sehr es auch den musikalischen Dogmen widersprechen mag, daß diese unsere Folgerung mit der Wirklichkeit übereinstimmt, vorausgesetzt,

daß man eben wirklich einfache Töne zu den Versuchen benutzt. Ebenso verhält es sich mit den der großen Sexte benachbarten Intervallen, auch diese zeigen keinen Unterschied, solange sie der Quinte und Oktave fern genug bleiben. Während es deshalb gar nicht schwer ist, reine große und kleine Terzen auf dem Harmonium oder anderen Zungenpfeifen, oder an der Violine zu stimmen, indem man die beiden zu stimmenden Töne gleichzeitig angibt und die Schwebungen fortzuschaffen sucht, so ist es ganz unmöglich, dasselbe ohne Hilfe anderer Intervalle an gedackten Orgelpfeifen und Stimmgabeln zu tun. Wie sich schließlich aber doch die Stimmung dieser Intervalle auch für solche einfache Töne genau bestimmt, sobald mehr als zwei Töne zusammenkommen, wird sich später zeigen.

In der Mitte zwischen den Klängen mit vielen und starken Obertönen, für welche uns die Zungenpfeifen und die Violinen Beispiele sind, und den ganz einfachen Tönen der Stimmgabeln und gedackten Pfeifen stehen die Klänge, bei denen nur die niedersten Obertöne noch hörbar sind, wie es bei den weiteren offenen Orgelpfeifen und bei menschlichen Stimmen für die dunkleren Vokale der Fall ist. Bei diesen würden die Obertöne allein nicht ausreichen, um sämtliche konsonierende Intervalle zu begrenzen, aber mit Hilfe der ersten Differenztöne geschieht es dennoch.

A. Klänge, welche neben dem Grundton noch die Oktave als Oberton hören lassen; für sie sind Quinte und Quarte nicht mehr durch Schwebungen der Obertöne, wohl aber durch Schwebungen der ersten Differenztöne begrenzt.

a) Quinte. Die Schwingungszahlen der Grundtöne seien 200 und 301, dazu kommen ihre Obertöne 400 und 602; diese vier bleiben zu fern voneinander, um Schwebungen zu geben. Aber die Differenztöne:

$$\begin{array}{rl} 301 - 200 & = 101 \\ 400 - 301 & = 99 \\ \hline \text{Differenz:} & 2 \end{array}$$

geben zwei Schwebungen. Und zwar ist die Anzahl dieser Schwebungen wieder ebenso groß, als wären sie durch die nächst höheren Obertöne hervorgebracht. Nämlich:

$$2 \cdot 301 - 3 \cdot 200 = 2.$$

b) Quarte. Die Schwingungszahlen seien 300 und 401, dazu die Obertöne 600 und 802; diese geben noch keine Schwebungen. Aber die ersten Differenztöne:

$$\begin{array}{r} 600 - 401 = 199 \\ 802 - 600 = 202 \\ \hline \text{Differenz: } 3 \end{array}$$

geben drei Schwebungen.

Für die Terzen würden noch Kombinationstöne zweiter Ordnung eintreten müssen.

B. Klänge, welche neben dem Grundton die Duodezime hören lassen. Ein Beispiel solcher Klänge geben die engen gedackten Pfeifen der Orgel (Register: Quintaten). Diese verhalten sich ebenso wie die, welche bloß Oktaven als Begleitung des Grundtones hören lassen.

a) Quinte. Grundtöne 200 und 301 mit Obertönen 600 und 903. Erster Differenzton:

$$\begin{array}{r} 903 - 600 = 303 \\ \text{Quinte} = 301 \\ \hline \text{Zahl der Schwebungen: } 2 \end{array}$$

b) Quarte. Grundtöne 300 und 401 mit Obertönen 900 und 1203. Erster Differenzton:

$$\begin{array}{r} 1203 - 900 = 303 \\ \text{Grundton} = 300 \\ \hline \text{Zahl der Schwebungen: } 3 \end{array}$$

Schwebungen der Terzen können auch in diesem Fall nur durch die schwachen zweiten Differenztöne eintreten.

C. Klänge, bei denen neben den Grundtönen gleichzeitig die Oktaven und Duodezimen als Obertöne hörbar sind. Beispiele solcher Klänge geben die weiteren (hölzernen) offenen Pfeifen der Orgel (Prinzipal-Register). Bei diesen sind die Quinten schon durch Schwebungen der Obertöne begrenzt, die Quarten noch nicht. Hier reichen die ersten Differenztöne auch für die Begrenzung der beiden Terzen aus.

a) Große Terz. Grundtöne 400 und 501 mit den Oktaven 800 und 1002 und den Duodezimen 1200 und 1503. Erste Differenztöne:

$$\begin{array}{r} 1002 - 800 = 202 \\ 1200 - 1002 = 188 \\ \hline \text{Zahl der Schwebungen: } 4 \end{array}$$

b) Kleine Terz. Grundtöne 500 und 601, Oktaven 1000 und 1202, Duodezimen 1500 und 1803. Differenztöne:

$$\begin{aligned} 1500 - 1202 &= 298 \\ 1803 - 1500 &= 303 \end{aligned}$$

Zahl der Schwebungen: 5

c) Große Sexte. Grundtöne 300 und 501, Oktaven 600 und 1002, Duodezimen 900 und 1503. Differenztöne:

$$\begin{aligned} 600 - 501 &= 99 \\ 1002 - 900 &= 102 \end{aligned}$$

geben Schwebungen: 3

In der Tat sind denn auch an den offenen Orgelpfeifen nicht bloß die Schwebungen der unreinen Quinten und Quarten, sondern auch die der unreinen großen und kleinen Terzen leicht zu hören, und lassen sich unmittelbar zum Stimmen der Pfeifen benutzen.

So treten die Kombinationstöne ergänzend ein, wo die Obertöne wegen der Art der Klänge nicht ausreichen, um jede Unreinheit der konsonierenden Intervalle der Oktave, Quinte, Quarte, großen Sexte, großen und kleinen Terz zur Quelle von Schwebungen und Rauhigkeit des Zusammenklanges zu machen, und die genannten Intervalle vor allen ihren Nachbarintervallen auszuzeichnen. Nur für die ganz einfachen Töne fehlen uns bisher noch die Bestimmungsmittel der Terzen, und auch die Schwebungen, welche den Wohlklang der unreinen Quinten und Quarten stören, sind verhältnismäßig zu schwach, um auf das Ohr eine erhebliche Wirkung zu tun, weil sie auf Kombinationstönen höherer Ordnung beruhen. In der Tat habe ich schon angeführt, daß zwei gedackte Pfeifen, deren Intervall zwischen großer und kleiner Terz liegt, eine ganz ebenso gute Konsonanz geben, als wenn das Intervall genau einer großen oder genau einer kleinen Terz entspräche. Ich will damit nicht behaupten, daß ein geübtes musikalisches Ohr ein solches Intervall nicht als fremd und ungewohnt erkennen und deshalb vielleicht für falsch erklären würde, aber der unmittelbare Eindruck auf das Ohr, der einfache sinnliche Wohlklang, abgesehen von aller musikalischen Gewohnheit, ist kein schlechterer als der der reinen Intervalle.

Ganz anders wird aber die Sache, wenn mehr als zwei Töne zusammenkommen. Wir haben gesehen, daß die Oktaven auch bei einfachen Tönen genau begrenzt sind durch die Schwebungen des

ersten Differenztones mit dem Grundton. Denken wir nun zunächst eine Oktave rein gestimmt, und setzen wir zwischen deren beide Töne einen dritten Ton als Quinte hinein, so bekommen wir Schwebungen der ersten Differenztöne, sobald die Quinte nicht rein ist.

Es seien gegeben die Töne 200 und 400, welche eine reine Oktave bilden, und deren unreine Quinte 301. Die Differenztöne:

$$\begin{aligned} 400 - 301 &= 99 \\ 301 - 200 &= 101 \end{aligned}$$

geben Schwebungen: 2

Diese Schwebungen der Quinte, welche zwischen zwei Oktaven liegt, sind viel deutlicher als die der Quinte allein ohne Oktave. Die letzteren beruhen auf den schwachen Differenztönen zweiter Ordnung, jene auf solchen erster Ordnung. Daher auch schon Scheibler für das Stimmen von Stimmgabeln die Vorschrift gegeben hat, erst zwei derselben als reine Oktave zu stimmen, und dann beide zugleich mit der Quinte tönen zu lassen, um diese zu stimmen. Sind Quinte und Oktave rein gestimmt, so geben beide auch miteinander die reine Quarte.

Ebenso verhält es sich nun, wenn man zwei einfache Töne zur Quinte rein gestimmt hat, und zwischen beide einen dritten als große Terz einschieben will. Es seien die Töne der reinen Quinte 400 und 600; wollte man zwischen beide die unreine große Terz 501 statt der reinen 500 einschieben, so haben wir folgende Differenztöne:

$$\begin{aligned} 600 - 501 &= 99 \\ 501 - 400 &= 101 \end{aligned}$$

geben Schwebungen: 2

Die große Sexte bestimmt sich, sobald wir sie mit der Quarte verbinden. Es seien die Töne 300 und 400 eine reine Quarte, 501 eine unreine Sexte, so haben wir Differenztöne:

$$\begin{aligned} 501 - 400 &= 101 \\ 400 - 300 &= 100 \end{aligned}$$

geben Schwebungen: 1

Wollen wir zwischen zwei Töne, die im Verhältnis einer reinen Quarte 300 und 400 miteinander stehen, noch einen Ton einschieben, so kann dies nur die verminderte Terz 350 sein. Nehmen wir 351, so erhalten wir die Differenztöne:

$$\begin{aligned} 400 - 351 &= 49 \\ 351 - 300 &= 51 \end{aligned}$$

Schwebungen: 2

Diese Intervalle $^8/_7$ und $^7/_6$ werden aber überhaupt schon zu eng, um noch Konsonanzen zu geben, sie können deshalb nur in schwach dissonierenden Akkorden (Septimenakkorden) vorkommen.

Die eben angestellten Betrachtungen sind nun auch auf jeden aus mehreren Teiltönen zusammengesetzten Klang anzuwenden. Je zwei Teiltöne eines solchen müssen bei hinreichender Stärke im Ohr ebenfalls Differenztöne hervorbringen. Entsprechen nun die Obertöne genau der Reihe der harmonischen Obertöne, wie sie durch die Reihe der kleineren ganzen Zahlen gegeben sind, so fallen alle Kombinationstöne der Obertöne mit den Obertönen selbst genau zusammen, ohne Schwebungen zu geben. Wenn n die Schwingungszahl des Grundtones bezeichnet, so sind $2n$, $3n$, $4n$ usw. die Schwingungen der Obertöne und die Differenzen dieser Zahlen immer wieder n oder $2n$ oder $3n$ usw. Auch die Schwingungszahlen der Summationstöne fallen in dieselbe Reihe hinein.

Sind dagegen die Schwingungszahlen der Obertöne auch nur wenig abweichend von dem genannten Verhältnis, so werden die Kombinationstöne voneinander und von den Obertönen abweichend und man bekommt Schwebungen. Der Klang verliert damit den gleichmäßig ruhigen Eindruck, den ein Klang mit harmonischen Obertönen auf das Ohr macht. Wie erheblich dieser Einfluß ist, läßt sich an jeder gut befestigten und wohlklingenden Saite erkennen, wenn man nur ein wenig Wachs in irgend einem Punkt ihrer Länge anklebt. Dadurch entsteht, wie Theorie und Versuch zeigen, ein unharmonisches Verhältnis der Obertöne zueinander. Ist die Masse des Wachses sehr klein, so ist auch die Veränderung der Töne sehr unbedeutend. Aber die kleinste Verstimmung genügt, um den Wohlklang erheblich zu beschädigen, den Klang stumpf, kesselähnlich und rauh zu machen.

Hieraus ergibt sich also der Grund, warum in der Empfindung des Ohres die Klänge mit harmonischen Obertönen eine so bevorzugte Rolle spielen. Sie sind die einzigen, welche auch bei größerer Intensität im Ohr gleichmäßig und ruhig anhaltende Empfindungen ohne Schwebungen hervorbringen können, entsprechend der rein periodischen Luftbewegung, die die objektive Grundlage dieser Klänge ist. Ich habe schon als Ergebnis der Übersicht, welche ich im fünften Abschnitt der ersten Abteilung von der Zusammensetzung

der musikalischen Klänge gegeben habe, angeführt, daß neben den Klängen mit harmonischen Obertönen in der Musik nur noch, und doch auch meist nur in untergeordneter Rolle, solche gebraucht werden, welche entweder, wie die Klänge gut gestimmter Glocken, einen Abschnitt aus der Reihe der harmonischen Partialtöne darstellen, oder welche so schwache oder (wie bei den Stäben) so weit vom Grundton entfernte Nebentöne besitzen, daß die Differenztöne wenig ins Gewicht fallen, oder wenigstens keine deutlichen Schwebungen verursachen können.

Fassen wir die Resultate unserer Untersuchungen über die Schwebungen zusammen, so ergibt sich, daß, wenn wir zwei oder mehrere Töne nebeneinander erklingen lassen, diese nur dann, wenn ihre Intervalle gewisse ganz genau bestimmte Werte haben, nebeneinander ungestört abfließen können. Einen solchen ungestörten Abfluß mehrerer zusammenklingender Töne nennen wir Konsonanz. Sobald nicht jene genau bestimmten Verhältnisse der Konsonanz eingehalten werden, entstehen Schwebungen, d. h. die ganzen Klänge oder einzelne Teiltöne und Kombinationstöne dieser Klänge verstärken sich abwechselnd und heben sich dann wieder gegenseitig auf. Die Klänge bestehen dann also nicht ungestört nebeneinander im Ohr, sondern sie hemmen gegenseitig ihren gleichmäßigen Abfluß. Diesen Vorgang nennen wir Dissonanz.

Die allgemeinste Ursache zur Erzeugung von Schwebungen geben die Kombinationstöne; sie sind die einzige Ursache bei einfachen Tönen, die so weit oder weiter als eine kleine Terz voneinander entfernt sind. Bei je zwei Tönen genügen sie wohl zur festen Begrenzung der Quinte, allenfalls der Quarte, aber nicht zur Begrenzung der Terzen oder Sexten. Doch werden auch diese fest begrenzt, sobald die große Terz mit der Quinte zum Durdreiklang, die Sexte mit der Quarte zum Quartsextenakkord verbunden wird.

Auch die Terzen werden aber im Zusammenklang von nur zwei Tönen genau begrenzt durch deutlich erkennbare Schwebungen der unrein gestimmten Intervalle, sobald nur die ersten beiden Obertöne zum Grundton sich gesellen. Immer stärker und schärfer werden die Schwebungen der unreinen Intervalle, je zahlreicher und stärker die Obertöne in den Klängen werden. Dadurch wird denn auch der Unterschied der Dissonanzen von den Konsonanzen und der unrein

gestimmten Konsonanzen von den rein gestimmten immer entschiedener und schärfer ausgesprochen, was sowohl für die Sicherheit, mit der der Hörer die richtigen Intervalle als solche anerkennt, wie für die kräftige künstlerische Wirkung der Akkordfolge von großer Wichtigkeit ist. Werden endlich die hohen Obertöne verhältnismäßig zu kräftig (in den scharfen und schmetternden Klangfarben), dann wird jeder einzelne Ton schon durch die Dissonanzen seiner hohen Obertöne intermittierende Tonempfindungen veranlassen, und jede Verbindung von zwei oder mehreren Klängen der Art bringt eine merkliche Steigerung dieser Schärfe hervor, während gleichzeitig die große Menge von Obertönen und Kombinationstönen es dem Hörer sehr erschweren, einer verwickelten Stimmführung zu folgen.

Es sind diese Verhältnisse von größter Wichtigkeit für die Anwendung der verschiedenen Instrumente in den verschiedenen Gattungen musikalischer Kompositionen. Die Rücksichten, welche man bei der Auswahl des passenden Instrumentes für eine ganze Komposition oder für einzelne musikalische Phrasen in Sätzen, die für Orchester geschrieben sind, zu nehmen hat, sind sehr mannigfacher Art. Vor allen Dingen kommt es sehr an auf den Grad der Beweglichkeit und auf die Kraft des Tones der verschiedenen Instrumente; das liegt auf der Hand, und wir brauchen darauf hier nicht näher einzugehen. In der Beweglichkeit überragen die Streichinstrumente und das Klavier, denen sich zunächst Flöten und Oboen anschließen, alle anderen. Den Gegensatz zu ihnen bilden die schwerfällig einherschreitenden Trompeten und Posaunen, die dagegen an Kraft alle anderen Instrumente besiegen. Eine andere wesentliche Rücksicht ist die auf die Ausdrucksfähigkeit, welche hauptsächlich davon abhängt, ob die Tonstärke jeden Grad von Steigerung und Schwächung nach dem Willen des Musizierenden leicht, schnell und sicher zuläßt. In dieser Beziehung sind wieder die Streichinstrumente und mit ihnen die menschliche Stimme allen anderen überlegen. Die künstlichen Zungenwerke, die Holzblasinstrumente sowohl wie die Blechinstrumente, können unter eine gewisse Tonstärke nicht hinabgehen, ohne daß ihre Zunge aufhört zu schwingen. Die Flöten und Orgelpfeifen können überhaupt ihre Tonstärke nicht viel verändern, ohne zugleich ihre Tonhöhe zu ändern. Auf dem Klavier beherrscht der Spieler zwar willkürlich die Stärke des ersten Anschlages, aber nicht die Fortdauer des Tones;

dadurch ist allerdings eine sehr feine Beherrschung der rhythmischen Akzente auf diesem Instrument möglich, aber der eigentlich melodische Ausdruck ist beschränkt. Alle diese Momente haben ihren Einfluß auf den Gebrauch der genannten Instrumente; sie sind leicht zu beobachten und sind längst erkannt und berücksichtigt worden. Schwieriger war der Einfluß der eigentlichen Klangfarbe zu definieren; indessen haben uns unsere Untersuchungen über die Zusammensetzung der Klänge doch die Mittel an die Hand gegeben, um wenigstens von den hauptsächlichsten Unterschieden in der Wirkung des Zusammenklanges verschiedener Instrumente Rechenschaft geben zu können und zu zeigen, auf welchem Wege diese Aufgabe zu lösen ist, wenn auch hier im einzelnen noch ein großes Feld für eingehendere Untersuchungen vorläufig unbearbeitet liegen bleibt.

Beginnen wir mit den einfachen Tönen der weiten gedackten Orgelpfeifen. Sie sind an und für sich sehr weich, sehr sanft, in der Tiefe dumpf, in der Höhe aber durchaus wohlklingend. Zu harmonischer Musik sind sie aber, wenigstens für unser modernes musikalisches Gefühl, gänzlich ungeeignet. Wir haben auseinander gesetzt, daß für dergleichen einfache Töne nur die engen Intervalle der Sekunden eine durch starke Schwebungen charakterisierte Dissonanz geben. Unreine Oktaven und die der Oktave benachbarten dissonanten Intervalle, Septimen und Nonen, geben Schwebungen des ersten Kombinationstones, welche doch schon verhältnismäßig schwach sind im Vergleich mit denen, welche Obertöne hervorbringen. Die Schwebungen der verstimmten Quinten und Quarten sind vollends nur noch unter den günstigsten Bedingungen zu hören. Im allgemeinen unterscheidet sich deshalb der Eindruck dissonanter Intervalle, mit Ausnahme der Sekunden, nur sehr wenig von dem der Konsonanzen, und die Folge davon ist, daß die Harmonie allen Charakter und der Hörer das sichere Gefühl für den Unterschied der Intervalle verliert. Wenn man polyphone Kompositionen mit den herbsten und kühnsten Dissonanzen auf dem gedackten Register der Orgel spielt, klingt alles fast gleichmäßig weich und wohlklingend, aber deshalb auch unbestimmt, langweilig, schwächlich, charakterlos und energielos. Ich bitte jeden meiner Leser, welcher Gelegenheit dazu hat, sich davon zu überzeugen. Es gibt keinen besseren Beweis für die wichtige Rolle, welche die Obertöne in der Musik spielen, als der beschriebene Eindruck solcher

Musik, die aus einfachen Tönen zusammengesetzt ist. Der Gebrauch der weiten gedackten Register ist deshalb beschränkt und man nimmt sie nur, um im Gegensatz gegen schärfere Register einzelne musikalische Phrasen von weichstem Wohlklang herauszuheben; sonst gebraucht man sie nur mit anderen Registern verbunden, um deren Grundton zu verstärken. Den weiten gedackten Orgelpfeifen am nächsten in der Klangfarbe stehen die Flöten und die Flötenregister der Orgel (schwach angeblasene offene Pfeifen). Bei ihnen tritt schon die Oktave deutlich zum Grundton der Klänge hinzu, bei scharfem Blasen auch die Duodezime. In diesem Falle sind die Oktaven und die Quinten schon schärfer durch Obertöne begrenzt, die Terzen und Sexten aber nur erst noch schwach durch Kombinationstöne. Ihr musikalischer Charakter ist deshalb dem vorher beschriebenen der gedackten Orgelpfeifen noch sehr ähnlich, was sehr gut ausgedrückt wird in dem bekannten Witzwort, daß einem musikalischen Ohr nichts schrecklicher sei als ein Flötenkonzert, ausgenommen ein Konzert von zwei Flöten. Im Verein mit anderen Instrumenten dagegen, welche das Gefüge der Harmonie deutlich hervorheben, ist die Flöte wegen der vollkommenen Weichheit ihres Tones und ihrer leichten Beweglichkeit ungemein lieblich und anmutig, und durch kein anderes Instrument zu ersetzen. In der antiken Musik hat die Flöte eine viel größere Rolle gespielt als in der heutigen, was mit dem ganzen Charakter der klassischen Kunstideale zusammenhängen mag. Die klassische Kunst hielt überhaupt alles den Sinnen direkt Unangenehme aus ihren Gebilden fern, und beschränkte sich auf die reine Schönheit, während die moderne Kunst reichere Ausdrucksmittel verlangt und deshalb auch bis zu einem gewissen Grade das dem sinnlichen Wohlgefallen an sich Widerstreitende in ihren Kreis aufnimmt. Übrigens stritten doch auch im Altertum die ernsten Musikfreunde für die schärferen Klänge der Saiteninstrumente im Gegensatz zu der weichlichen Flöte.

Eine günstige Mitte für die harmonischen Anforderungen verwickelter polyphoner Musik bilden die Register der offenen Orgelpfeifen, welche deshalb auch den Namen der Prinzipalregister führen. Sie geben die niederen Obertöne deutlich hörbar, die weiten Pfeifen bis zum dritten, die engen (Geigenprinzipal) bis zum sechsten Partialton. Die weiteren haben mehr Tonkraft als die

engeren; um ihnen mehr Schärfe zu geben, wird sehr gewöhnlich das achtfüßige Register, welches die Hauptstimmen enthält, noch mit dem vierfüßigen verbunden, welches jeder Note ihre Oktave beifügt; oder man verbindet auch das Prinzipal mit dem Geigenprinzipal, so daß das erstere dem Ton die Kraft, das zweite die Schärfe gibt. So bringt man Klangfarben hervor, welche die Obertöne in mäßiger, nach der Höhe abnehmender Stärke bis zum sechsten hinauf enthalten, bei denen daher das Gefühl für die Reinheit der konsonanten Intervalle sicher bestimmt ist, Konsonanzen und Dissonanzen scharf unterschieden sind, ohne daß jedoch die nicht zu vermeidenden schwachen Dissonanzen der höheren Obertöne in den unvollkommeneren Konsonanzen sich zu sehr bemerklich machten, und ohne daß die Menge und Stärke der Nebentöne den Hörer über die Führung der Stimmen irremachen könnte. Die Orgel bietet in dieser Beziehung einen Vorteil, den andere Instrumente nicht in gleicher Weise gewähren, daß der Spieler nämlich die Klangfarbe sich mischen und verändern kann, wie ihm beliebt und wie sie sich dem Charakter des zu spielenden Stückes am besten anpaßt.

Die engen gedackten Pfeifen (Quintaten), bei denen der Grundton von der Duodezime begleitet ist, die Rohrflöten, wo außer dem dritten noch der fünfte Ton hinzukommt, die kegelförmigen offenen Pfeifen, wie das Register Gemshorn, welche gewisse höhere Obertöne mehr verstärken als die niederen, dienen nur dazu, gewisse absonderliche Klangfarben für einzelne Stimmen zu geben und diese dadurch von den übrigen abzuheben. Um die Hauptmasse der Harmonie zu bilden, sind sie wenig geeignet.

Ganz scharfe Klangfarben endlich erhält man durch die Zungenpfeifen und die Mixturen der Orgel. Die letzteren sind, wie schon früher erörtert wurde, künstliche Nachbildungen der natürlichen Zusammensetzung aller Klänge, indem jede Taste gleichzeitig eine Reihe von Pfeifen ertönen läßt, welche den drei bis sechs ersten Partialtönen der betreffenden Note entsprechen. Sie sind nur als Begleitung des Gemeindegesanges anwendbar; isoliert gebraucht, machen sie einen unerträglichen Lärm und ein heilloses Gewirr von Tönen. Wenn aber der Gesang der Gemeinde die Grundtöne in den Noten der Melodie überwältigend stark hervortreten läßt, wird das richtige Verhältnis der Klangfarbe wieder hergestellt und eine mächtige und

wohlproportionierte Klangmasse gewonnen. Ohne die Hilfe der Mixturen würde sich auch eine so große und von ungeübten Stimmen hervorgebrachte Klangfülle gar nicht beherrschen lassen.

Den Klangfarben der Orgel sind im ganzen die Menschenstimmen in harmonischer Beziehung ziemlich ähnlich. Zwar werden bei den helleren Vokalen einzelne hoch gelegene Obertöne hervorgehoben, diese sind aber doch zu vereinzelt, um einen wesentlichen und durchgehenden Einfluß auf den Klang der Akkorde auszuüben. Der letztere hängt doch immer mehr ab von den niederen, bei allen Vokalen ziemlich gleichmäßig eintretenden Obertönen. Aber allerdings können bei einzelnen Konsonanzen die charakteristischen Töne der Vokale eine besondere Rolle spielen. Wenn zwei menschliche Stimmen z. B. die Terz *b d'* zusammen singen auf den Vokal *A*, werden der vierte Teilton des *b*, nämlich *b''*, und der dritte des *d'*, nämlich *a''*, gerade in die charakteristisch starken Obertöne des *A* hineinfallen, und es wird die Unvollkommenheit der Terzenkonsonanz in der Dissonanz *a'' b''* grell zutage treten müssen, während die Dissonanz bei der Wahl des Vokals *O* ausbleiben muß. Andererseits wird die Quarte *b es'* auf den Vokal *A* gesungen rein erklingen, weil dann auch die zweite Note *es'* dasselbe *b''* als Oberton gibt wie die tiefere. Dagegen werden bei dieser Quarte entweder die Obertöne *f''* und *es''* oder *d'''* und *es'''* stören können, wenn man das *A* entweder nach *A O* oder nach *Ä* hinüberzieht. Aus diesen Betrachtungen folgt unter anderem, daß die Übersetzung des Textes von Gesangkompositionen aus einer Sprache in die andere auch für den rein musikalischen Effekt gar nicht gleichgültig sein kann.

Abgesehen nun von diesen Verstärkungen, welche die charakteristische Resonanz jedes Vokales einzelnen Obertönen angedeihen läßt, sind im ganzen die Klänge des menschlichen Gesanges von den niederen Obertönen in mäßiger Stärke begleitet und deshalb zu Akkordverbindungen gut geeignet, ähnlich denen der Prinzipalregister der Orgel. Außerdem haben aber die menschlichen Stimmen für die Ausführung polyphoner Musik noch einen besonderen Vorteil vor der Orgel und vor allen übrigen Tonwerkzeugen. Dadurch nämlich, daß von den menschlichen Stimmen Worte gesungen werden, werden die Noten, welche jeder einzelnen Stimme angehören, miteinander verbunden, und die Worte bilden für den Hörer einen leitenden Faden,

welcher ihn leicht und sicher die zusammengehörigen Teile der Klangmasse auffinden und verfolgen läßt. An der menschlichen Stimme hat sich daher auch die polyphone Musik und das ganze neuere System der Harmonie zuerst entwickelt, und in der Tat gibt es auch nichts Wohllautenderes, als gut harmonisierte mehrstimmige Sätze von geübten Stimmen rein und richtig vorgetragen. Aber freilich ist es für den vollen Wohlklang solcher Sätze ein ganz unumgängliches Erfordernis, daß nach reinen musikalischen Intervallen gesungen werde, und leider lernen dies unsere jetzigen Sänger selten mehr, da sie von Anfang an gewöhnt werden, in Begleitung von Instrumenten zu singen, welche nach gleichschwebender Temperatur, also in ungenauen Konsonanzen, gestimmt sind. Nur solche Sänger, welche selbst feinen musikalischen Sinn haben, finden in dieser Beziehung von selbst das Richtige, was ihnen die Schule nicht mehr gibt.

Reicher an Obertönen und deshalb von schärferem Klang als die menschliche Stimme und die Prinzipalregister der Orgel sind demnächst die für die Musik so wichtigen Streichinstrumente. Sie spielen durch ihre außerordentliche Beweglichkeit und Ausdrucksfähigkeit eine bevorzugte Rolle in der Instrumentalmusik, und nehmen durch die mäßige Schärfe ihrer Klangfarbe etwa eine mittlere Stellung ein zwischen den weicheren Flöten und den schmetternden Blechinstrumenten. Zwischen den verschiedenen Instrumenten dieser Klasse findet selbst eine kleine Verschiedenheit statt, insofern Viola und Kontrabaß eine etwas schärfere und magere Klangfarbe, d. h. relativ stärkere Obertöne haben als Violine und Cello. Die hörbaren Obertöne reichen bis zum sechsten oder achten hinauf, je nachdem der Bogen im Piano mehr dem Griffbrett, oder im Forte mehr dem Steg genähert wird, und sie nehmen in Stärke regelmäßig ab in dem Maße, wie ihre Ordnungszahl steigt. Es ist deshalb auf den Streichinstrumenten der Unterschied zwischen Konsonanz und Dissonanz scharf und kräftig ausgesprochen und das Gefühl für die Reinheit der Intervalle sehr sicher, wie denn auch bekannt ist, daß namentlich die geübten Violin- und Cellospieler ein sehr feines Ohr für Unterschiede der Tonhöhe haben. Andererseits ist aber doch die Schärfe der Klänge wieder so groß, daß weiche gesangreiche Melodien für die Streichinstrumente nicht mehr recht passen und im Orchester besser an die Flöten und Klarinetten abgegeben werden. Außerdem

werden auch vollstimmige Akkorde verhältnismäßig zu rauh, da bei jedem konsonanten Intervall sich diejenigen Obertöne der beiden Klänge, welche in dissonante Verhältnisse gegeneinander zu stehen kommen, ziemlich bemerklich machen, namentlich bei Terzen und Sexten. Dazu kommt freilich noch, daß die unvollkommenen Terzen und Sexten der schulmäßigen musikalischen Skala auf den Streichinstrumenten sich schon sehr merklich von dem Klang reiner Terzen und Sexten unterscheiden, wenn der Spieler nicht dafür die reinen natürlichen Intervalle zu setzen weiß, wie sie das Ohr fordert. Man pflegt deshalb in den Kompositionen für Streichinstrumente langsam hinfließende Akkorde nur selten und ausnahmsweise anzuwenden, weil diese nicht genug Wohlklang haben, dagegen schnelle Bewegungen und Figuren, harpeggierte Akkorde zu bevorzugen, für welche diese Instrumente außerordentlich geeignet sind, und in denen die Schärfe ihrer Zusammenklänge sich nicht so merklich machen kann.

Eigentümlich verhalten sich die Schwebungen bei den Streichinstrumenten, indem wenigstens regelmäßige, langsame und zählbare Schwebungen selten vorkommen. Der Grund liegt in den schon früher besprochenen kleinen Unregelmäßigkeiten bei der Einwirkung des Bogens auf die Saite, welche als Kratzen des Tones hörbar werden. Aus den Beobachtungen der Schwingungsfigur ging hervor, daß bei jedem kleinsten kratzenden Anstoß des Bogens die Schwingungskurven plötzlich eine Strecke vor- oder zurückspringen, oder die Schwingungen, nach physikalischem Ausdruck, plötzlich ihre Phase ändern. Da es nun von der Phasendifferenz abhängt, ob zwei zusammenklingende Töne sich gegenseitig verstärken oder schwächen, so wird durch jedes kleinste Anhaken oder Kratzen des Bogens auch der Ablauf der Schwebungen gestört, und wenn zwei Töne von gleicher Höhe gespielt werden, so wird jeder Sprung der Phase einen Wechsel in der Tonstärke hervorbringen können, ähnlich als ob unregelmäßig und abgerissen eintretende Schwebungen vorhanden wären. Es gehören deshalb die besten Instrumente und die besten Spieler dazu, um langsame Schwebungen oder auch einen gleichmäßigen Abfluß ausgehaltener konsonanter Akkorde hervorzubringen. Ich glaube, daß hierin vielleicht einer der Gründe zu suchen ist, warum Streichquartette, ausgeführt von Spielern, deren jeder für sich Solostücke ganz angenehm zu spielen vermag, zuweilen so unerträglich rauh und

scharf klingen, daß es gar nicht im richtigen Verhältnis steht zu dem, was jeder einzelne Spieler an kleinen Rauhigkeiten auf seinem Instrument hervorbringt. Bei meinen Beobachtungen der Schwingungsfiguren fand ich es schwer zu vermeiden, daß nicht in jeder Sekunde ein- oder zweimal ein Sprung in der Schwingungsfigur vorgekommen wäre. Wenn nun dabei im Solospiel der Ton der Saite auf fast unwahrnehmbar kleine Momente unterbrochen wird, was der Hörer kaum bemerkt, so gibt dies im Quartett, wenn ein Akkord angegeben wird, dessen Noten alle einen gemeinsamen Oberton haben, schon vier bis acht plötzlich und unregelmäßig eintretende Veränderungen der Tonstärke eines solchen gemeinsamen Tones, welche nicht unbemerkt vorübergehen können. Für ein gutes Zusammenspiel ist deshalb eine viel größere Sauberkeit des Tones nötig, als für das Solospiel.

Unter den Saiteninstrumenten, deren Saiten geschlagen werden, hat das Pianoforte die Hauptbedeutung. Aus der oben gegebenen Analyse seiner Klänge geht hervor, daß seine tiefen Oktaven reich an Obertönen sind, die höheren dagegen verhältnismäßig arm. In den tieferen Oktaven ist namentlich der zweite und dritte Partialton oft ebenso stark, ersterer auch wohl selbst stärker als der Grundton. Die Folge davon ist, daß die der Oktave benachbarten Dissonanzen, die Septimen und Nonen, fast ebenso scharf ausfallen, wie die Sekunden, und daß auch die verminderte und vergrößerte Duodezime und Quinte ziemlich rauh sind. Der vierte, fünfte und sechste Partialton dagegen, welche zur Begrenzung der Terzen dienen, nehmen an Stärke schnell ab, so daß die Terzen verhältnismäßig viel weniger scharf begrenzt sind, als die Oktaven, Quinten und Quarten. Das letztere Moment ist wichtig, weil es auf dem Klavier die ungenauen Terzen der temperierten Stimmung viel erträglicher macht, als auf anderen Instrumenten mit schärferen Klangfarben, während die Oktaven, Quinten und Quarten doch scharf und sicher abgegrenzt sind. Trotz der verhältnismäßig reichen Obertöne ist der Eindruck der Dissonanzen des Klaviers lange nicht so eindringlich, wie bei den Instrumenten mit lang ausgehaltenen Tönen, weil der Klavierton nur im Moment des ersten Anschlages große Stärke hat und dann sehr schnell an Stärke abnimmt, so daß die die Dissonanzen charakterisierenden Schwebungen nicht Zeit haben, während des ersten starken Einsatzes des Tones zur Erscheinung zu kommen; sie bilden sich erst, während der Ton an

Stärke schon wieder abnimmt. Man findet deshalb in der neueren Klaviermusik, seitdem namentlich Beethoven die charakteristischen Eigentümlichkeiten des Instrumentes in der Komposition zu berücksichtigen gelehrt hat, eine Verdoppelung und Häufung der dissonanten Intervalle, welche auf anderen Instrumenten ganz unerträglich wäre. Man findet den großen Unterschied leicht heraus, wenn man neuere Klavierkompositionen auf dem Harmonium oder der Orgel zu spielen versucht.

Daß die Instrumentenmacher, nur geleitet durch ein geübtes Gehör, nicht durch irgend eine Theorie, es vorteilhaft befunden haben, die Anschlagsstelle der Hämmer so zu legen, daß der siebente Partialton ganz wegfällt, der sechste zwar noch vorhanden ist, aber schwach, hängt offenbar mit der Konstruktion unseres Tonsystemes zusammen. Der fünfte und sechste Partialton dienen dazu, die kleine Terz zu begrenzen, und es sind auf diese Weise fast alle in der jetzigen Musik als Konsonanzen behandelten Intervalle auf dem Klavier durch koinzidierende Obertöne bestimmt, die Oktave, Quinte und Quarte durch relativ starke Töne, die große Sexte und Terz durch schwache, die kleine Terz durch die schwächsten. Käme der siebente Partialton noch hinein, so würde die verminderte Septime 4:7 den Wohlklang der kleinen Sexte beeinträchtigen, die verminderte Quinte 5:7 den der Quinte und Quarte, die verminderte Terz 6:7 den der kleinen Terz, ohne daß dabei neue musikalisch verwendbare Intervalle sicherer bestimmt würden.

Eine weitere Eigentümlichkeit in der Auswahl der Klangfarben, daß nämlich die hohen Töne des Klaviers viel weniger und schwächere Obertöne haben als die tieferen, haben wir ebenfalls schon erwähnt. Sie ist auf diesem Instrument viel deutlicher ausgesprochen als auf anderen, und es läßt sich leicht der musikalische Grund dafür angeben. Die hohen Noten werden der Regel nach zugleich mit tiefen angegeben, und ihr Verhältnis zu diesen tiefen Noten wird durch die hoch hinaufreichenden Obertöne der tiefen Noten leicht festgestellt. Wenn das Intervall zwischen der Note des Basses und des Diskantes zwischen zwei und drei Oktaven beträgt, so liegen die zweite Oktave, die höhere Terz und Quinte des Baßtones ganz in der Nähe der Note des Diskantes und geben mit ihr direkt Konsonanz oder Dissonanz, ohne daß noch die Obertöne der Diskantnote in das Spiel zu kommen brauchen. Die höchsten Noten des Klaviers würden durch Obertöne also nur eine scharfe Klangfarbe bekommen, ohne daß für die musi-

kalische Charakterisierung dadurch etwas gewonnen wäre, und durch den Bau der Hämmer wird es auf guten Instrumenten wirklich erreicht, daß die Noten der höchsten Oktaven nur noch schwach von ihrem zweiten Ton begleitet sind. Sie klingen dann mild und angenehm, flötenähnlich. Andere Instrumentenmacher lieben es denn freilich auch, diese hohen Noten gellend und durchdringend zu machen, gleich der Pikkoloflöte, indem sie die Anschlagsstelle der höchsten Saiten ganz an ihr Ende verlegen, durch welchen Kunstgriff sie die Obertöne stärker hervortreiben. Dadurch fällt aber die Klangfarbe dieser Saiten aus dem Charakter der übrigen Klänge des Instrumentes und verliert jedenfalls an Reiz.

An vielen anderen Instrumenten, bei deren Konstruktion man mit der Klangfarbe nicht so frei schalten kann, wie bei der des Pianofortes, hat man eine ähnliche Abänderung der Klangfarbe nach der Höhe hin durch andere Mittel zu erreichen gewußt. Bei den Streichinstrumenten dient dazu die Resonanz des Kastens, dessen eigene Töne innerhalb der tiefsten Oktave der Skala des Instrumentes liegen. Da die Partialtöne der tönenden Saiten in dem Maße stärker an die Luft abgegeben werden, als sie den Partialtönen des Kastens näher sind, so werden bei den hohen Noten dieser Instrumente die Grundtöne durch die Resonanz viel mehr über ihre Obertöne herausgehoben, als bei den tieferen. Bei den tiefsten Noten der Violine dagegen wird nicht bloß der Grundton, sondern auch seine Oktave und Duodezime durch die Resonanz begünstigt, da der tiefere Eigenton des Kastens zwischen dem Grundton und dem ersten Oberton, der höhere Eigenton zwischen dem ersten und zweiten Oberton liegt. Auch bei den Mixturen der Orgel kommt etwas Entsprechendes vor, indem man die Reihen der Obertöne, welche durch eigene Pfeifen dargestellt werden, für die hohen Noten des Registers kürzer macht, als für die tiefen Noten. Während man also mit jeder Taste der tieferen Oktaven sechs Pfeifen öffnet, entsprechend den ersten sechs Partialtönen ihrer Note, so nimmt man in den beiden obersten Oktaven zum Grundton nur die Oktave und Duodezime, oder die Oktave allein.

Auch bei der menschlichen Stimme findet sich ein ähnliches Verhältnis, wenn auch nach den verschiedenen Vokalen mannigfach wechselnd. Vergleicht man aber hohe und tiefe Noten, welche auf denselben Vokal gesungen werden, so verstärkt die Resonanz der

Mundhöhle gewöhnlich noch relativ hohe Obertöne der tiefen Noten des Basses, während im Sopran, wenn die Note des Gesanges sich der charakteristischen Tonhöhe des Vokales nähert, oder sie überschreitet, sämtliche Obertöne viel schwächer ausfallen. Daher sind im allgemeinen, wenigstens bei den offenen Vokalen, die hörbaren Obertöne des Basses viel zahlreicher als die des Soprans.

Es bleiben uns noch die künstlichen Zungenwerke, d. h. die Blasinstrumente aus Holz und Blech. Unter jenen zeichnet sich die Klarinette, unter diesen das Horn durch weichere Klangfarbe aus, während Fagott und Oboe einerseits, Posaune und Trompete andererseits die schärfsten in der Musik gebrauchten Klangfarben darstellen.

Trotzdem die zur sogenannten Harmoniemusik gebrauchten Klappenhörner einen viel weniger schmetternden Klang haben, als die eigentlichen Trompeten mit undurchbrochenem, festem Rohr, so ist doch die Zahl und Kraft ihrer Obertöne zu groß für den Wohlklang, namentlich der unvollkommeneren Konsonanzen, und die Akkorde dieser Instrumente klingen sehr rauschend, lärmend und scharf, so daß sie eben nur im Freien zu ertragen sind. In der künstlerischen Musik des Orchesters läßt man daher Trompeten und Posaunen, die wegen ihrer durchdringenden Kraft nicht zu entbehren sind, meist nur in wenigen und womöglich vollkommenen Konsonanzen zusammenklingen.

Die Klarinette unterscheidet sich von den übrigen Blasinstrumenten des Orchesters dadurch, daß ihr die geraden Obertöne fehlen, was nicht verfehlen kann, in die Wirkung ihrer Zusammenklänge manche sonderbare Abweichungen zu bringen. Wenn zwei Klarinetten zusammenwirken, so werden alle konsonanten Intervalle, mit Ausnahme der großen Sexte 3:5 und Duodezime 1:3, nur durch Kombinationstöne begrenzt werden. Doch genügen in allen Fällen die Differenztöne erster Ordnung, also die stärksten aller Kombinationstöne, die Schwebungen der verstimmten Konsonanzen hervorzubringen. Daraus folgt, daß im allgemeinen die Konsonanzen zweier Klarinetten wenig Schärfe haben werden und verhältnismäßig wohlklingend sein müssen, was auch der Fall ist, ausgenommen die kleine Sexte und kleine Septime, die sich der großen Sexte zu sehr nähern, und die Undezime und kleine Tredezime, die der Duodezime zu nahe kommen. Andererseits, wenn man eine Klarinette mit einer Violine oder Oboe zusammen gebraucht, werden die meisten Konsonanzen

merklich verschieden klingen müssen, je nachdem die Klarinette die obere oder untere Note des Zusammenklanges übernimmt. So wird z. B. eine große Terz *d' fis'* besser klingen müssen, wenn die Klarinette das *d'* und die Oboe das *fis'* übernimmt, so daß der fünfte Ton der Klarinette mit dem vierten der Oboe zusammenfällt. Die für die große Terz störenden Paare von Obertönen 3:4 und 5:6 können hier nicht zustande kommen, weil der vierte und sechste Ton auf der Klarinette fehlen. Geben wir aber das *d'* der Oboe, so fehlt dem *fis'* der Klarinette der koinzidierende vierte Ton; dagegen sind die störenden, der dritte und fünfte, vorhanden. Aus ähnlichen Gründen folgt, daß die Quarte und kleine Terz besser klingen müssen, wenn die Klarinette die obere Note übernimmt. Ich habe Versuche solcher Art angestellt mit der Klarinette und einem scharfen Register des Harmoniums, welches gerade Obertöne hat, und welches nach reinen Intervallen gestimmt war, nicht nach gleichschwebender Temperatur. Gab ich auf der Klarinette *b* an, und spielte auf dem Harmonium dazu *es'*, *d'*, *des'*, so klang die große Terz *b—d'* besser als die Quarte *b—es'*, und viel besser als die kleine Terz *b—des'*. Gab ich dagegen zu demselben Ton der Klarinette auf dem Harmonium nacheinander *f*, *ges*, *g* an, so klang die große Terz *ges—b* rauher, nicht bloß als die Quarte *f—b*, sondern selbst als die kleine Terz *g—b*.

Dieses Beispiel, auf welches mich rein theoretische Betrachtungen geleitet hatten, und welches sich beim Versuch sogleich als richtig bestätigte, führe ich hier nur an, weil sich daran zeigt, wie die den gewöhnlichen Klangfarben angepaßte Reihenfolge der Konsonanzen sich sogleich verändert, wenn abweichende Klangfarben gebraucht werden.

Das hier Gesagte mag genügen, um zu zeigen, daß auf dem eingeschlagenen Wege die Erklärung für mannigfache Eigentümlichkeiten in den Wirkungen des Zusammenklanges der verschiedenen musikalischen Instrumente gewonnen werden kann. Weiter auf diesen Gegenstand hier einzugehen, verbietet einesteils der Mangel an genügenden Vorarbeiten, namentlich an genaueren Untersuchungen über die einzelnen Abänderungen der Klangfarben, anderenteils würde uns die weitere Verfolgung dieses Weges zu sehr von unserem Hauptziel abführen und weniger allgemeines als technisch-musikalisches Interesse haben.

Zwölfter Abschnitt.

Von den Akkorden.

Wir haben bisher die Wirkung des Zusammenklanges je zweier Töne in bestimmten Intervallen untersucht; es ist nun ziemlich leicht zu ermitteln, was geschehen wird, wenn mehr als zwei Töne zusammenklingen. Zusammenklänge von mehr als zwei Einzelklängen nennen wir Akkorde. Zunächst wollen wir den Wohlklang der Akkorde ganz in demselben Sinn untersuchen, wie wir es mit dem Wohlklang je zweier zusammenklingender Töne gemacht haben. Wir beschäftigen uns nämlich in diesem Abschnitt nur mit der Wirkung, welche der betreffende Akkord isoliert und getrennt aus allen musikalischen Verbindungen, ohne Beziehung auf Tonart, Tonleiter, Modulation usw. hervorbringt. Unsere erste Aufgabe ist, zu bestimmen, unter welchen Bedingungen Akkorde konsonant sind. Damit ein Akkord konsonant sein könne, ist zunächst klar, daß jeder Ton desselben mit jedem anderen konsonant sein müsse; denn wenn nur zwei von den Tönen des Akkordes miteinander dissonieren und Schwebungen geben, so ist der Wohlklang des Akkordes gestört. Die konsonanten Akkorde von je drei Tönen finden wir, wie leicht zu ersehen ist, indem wir zu einem Grundton, den wir *c* nennen wollen, zwei andere Töne hinzusetzen, deren jeder mit *c* ein konsonierendes Intervall bildet, und dann zusehen, ob auch das dritte neu entstehende Intervall, welches die beiden hinzugesetzten Töne miteinander bilden, konsoniert. Ist dies der Fall, so konsoniert jeder der drei Töne mit jedem anderen, und der Akkord ist konsonant.

Beschränken wir uns zunächst auf solche Intervalle, welche kleiner sind als eine Oktave. Unter den Intervallen, welche eine Oktave

nicht überschreiten, haben wir folgende Konsonanzen gefunden: 1. die Quinte $c—g$, $^3/_2$; 2. die Quarte $c—f$, $^4/_3$; 3. die große Sexte $c—a$, $^5/_3$; 4. die große Terz $c—e$, $^5/_4$; 5. die kleine Terz $c—es$, $^6/_5$; 6. die kleine Sexte $c—as$, $^8/_5$; an sie schließt sich endlich noch 7. die natürliche Septime $c—b_\flat$, $^7/_4$, die der kleinen Sexte an Wohlklang etwa gleichkommt. Die folgende Tabelle gibt nun eine Übersicht der Akkorde, deren Umfang kleiner als eine Oktave ist. Der Akkord soll bestehen aus dem Grundton C, je einem Ton der ersten Horizontalreihe und je einem Ton der ersten Vertikalreihe. Wo die den beiden gewählten Tönen entsprechenden Horizontal- und Vertikalreihen sich schneiden, ist das Intervall angegeben, welches die beiden gewählten Töne miteinander bilden. Dieses ist gesperrt gedruckt, wenn es eine Konsonanz ist, so daß dem Auge gleich ersichtlich wird, wo wir konsonierende Akkorde finden.

C	$G\,\frac{3}{2}$	$F\,\frac{4}{3}$	$A\,\frac{5}{3}$	$E\,\frac{5}{4}$	$Es\,\frac{6}{5}$	$As\,\frac{8}{5}$
$G\,\frac{3}{2}$						
$F\,\frac{4}{3}$	Große Sekunde $\frac{9}{8}$					
$A\,\frac{5}{3}$	Große Sekunde $\frac{10}{9}$	Große Terz $\frac{5}{4}$				
$E\,\frac{5}{4}$	Kleine Terz $\frac{6}{5}$	Kleine Sekunde $\frac{16}{15}$	Quarte $\frac{4}{3}$			
$Es\,\frac{6}{5}$	Große Terz $\frac{5}{4}$	Große Sekunde $\frac{10}{9}$	Übermäßige Quarte $\frac{25}{18}$	Kleine Sekunde $\frac{25}{24}$		
$As\,\frac{8}{5}$	Kleine Sekunde $\frac{16}{15}$	Kleine Terz $\frac{6}{5}$	Kleine Sekunde $\frac{25}{24}$	Verminderte Quarte $\frac{32}{25}$	Quarte $\frac{4}{3}$	
$B\,\frac{7}{4}$	Verminderte Terz $\frac{7}{6}$	Falsche Quarte $\frac{21}{16}$	Kleine Sekunde $\frac{21}{20}$	Verminderte Quinte $\frac{7}{5}$	Falsche Quinte $\frac{35}{24}$	Große Sekunde $\frac{35}{32}$

Es ergeben sich hieraus als die einzigen konsonierenden dreistimmigen Akkorde, welche innerhalb des Umfanges einer Oktave möglich sind, folgende sechs:

1. *CEG* 2. *CEs G*
3. *CFA* 4. *CFAs*
5. *CEs As* 6. *CEA.*

Die ersten beiden dieser Dreiklänge werden in der musikalischen Theorie als die fundamentalen Dreiklänge betrachtet, von denen alle anderen abgeleitet werden können. Wir können sie ansehen als aus zwei übereinander gesetzten Terzen bestehend, einer großen und einer kleinen. Der Akkord *CEG*, bei welchem die große Terz tiefer liegt, die kleine höher, ist ein Durdreiklang, und zwar ist er vor allen anderen Durdreiklängen dadurch ausgezeichnet, daß seine Töne am engsten zusammenliegen, und er wird deshalb als Grundakkord oder Stammakkord aller anderen Durakkorde betrachtet. Der Akkord *CEs G* dagegen, bei welchem die kleine Terz tiefer liegt, die große höher, ist der Stammakkord aller Molldreiklänge.

Die beiden folgenden Akkorde *CFA* und *CFAs* heißen nach ihrer Zusammensetzung Quartsextenakkorde. Wenn man als ihren tiefsten Ton nicht *C*, sondern G_1 nimmt, so verwandeln sie sich in

$$G_1\,CE \quad \text{und} \quad G_1\,CEs.$$

Man kann sie also aus dem fundamentalen Dur- und Molldreiklang *CEG* und *CEs G* entstanden denken, indem man die Quinte *G* desselben eine Oktave tiefer verlegt.

Die beiden letzten Akkorde *CEA* und *CEs As* heißen Terzsextenakkorde oder einfach Sextenakkorde. Nimmt man als Baßnote des ersten *E* statt *C*, so wird er *EGc*, und nimmt man als Baßnote des zweiten *Es* statt *C*, so wird er *Es Gc*. Sie können also als Umlagerungen eines fundamentalen Dur- und Molldreiklanges betrachtet werden, deren Grundton man eine Oktave höher gelegt hat.

In diesen Umlagerungen zusammengestellt, werden also jene sechs konsonierenden Akkorde folgende Form annehmen:

CEG *CEs G*
EGc *Es Gc*
Gce *Gc es.*

Wir bemerken hierbei zunächst, daß die natürliche Septime $B_{_}$, obgleich sie selbst mit dem Grundton C einen guten Zusammenklang gibt, der eher besser, denn schlechter als die kleine Sexte CAs klingt, doch in keinen Akkord eingetreten ist, weil sie mit allen anderen zu C konsonierenden Intervallen schlechtere Konsonanzen gibt, als sie selbst ist. Die besten Zusammenklänge, welche sie gibt, sind $CEB_{_}$ und $CGB_{_}$. In ersterem kommt das zwischen Quarte und Quinte in der Mitte liegende Intervall $EB_{_}$ vor, in letzterem die verminderte kleine Terz $GB_{_}$. Die kleine Sexte dagegen gibt mit der kleinen Terz eine reine Quarte, und mit der Quarte eine kleine Terz, so daß sie im Sexten- und Quartsextenakkord das schlechteste Intervall des Akkordes bleibt, daher diese Akkorde noch als konsonant gelten können. Dies ist der Grund, warum die natürliche Septime keine Anwendung als Konsonanz in der harmonischen Musik findet, während die kleine Sexte, die an und für sich nicht wohlklingender ist als jene, anwendbar ist.

Sehr lehrreich für die Theorie der Musik, worauf wir später zurückkommen werden, ist der Akkord $CEAs$. Wir müssen ihn unter die dissonanten rechnen, weil er die verminderte Quarte EAs enthält, deren Zahlenverhältnis $\frac{32}{25}$ ist. Diese verminderte Quarte ist nun so nahe gleich einer großen Terz $EGis$, daß auf unseren Tastaturinstrumenten, Orgel und Klavier, diese beiden Intervalle gar nicht unterschieden werden. Es ist nämlich

$$EAs = \frac{32}{25} = \frac{5}{4} \cdot \frac{128}{125},$$

oder abgekürzt, nahehin:

$$(EAs) = (E \cdot Gis) \cdot \frac{43}{42}.$$

Auf dem Klavier sieht es so aus, als wenn dieser Akkord, den man für den Zweck der praktischen Ausführung nach Belieben $CEAs$ oder $CEGis$ schreiben könnte, konsonant sein müßte, denn jeder Ton desselben bildet mit jedem anderen ein Intervall, welches auf dem Klavier als konsonant betrachtet wird, und doch ist dieser Akkord eine der herbsten Dissonanzen, worüber alle Musiker einig sind, und wovon man sich jeden Augenblick überzeugen kann. Auf einem nach reinen Intervallen gestimmten Instrument gibt sich freilich

gleich das Intervall *EAs* als entschieden dissonant zu erkennen. Es ist dieser Akkord ein treffendes Beispiel dafür, wie doch auch selbst in der ungenauen Stimmung des Klaviers der ursprüngliche Sinn der Intervalle sich geltend macht und das Urteil des Ohres bestimmt.

Was den Wohlklang der oben gefundenen verschiedenen Umlagerungen der Dreiklänge betrifft, so hängt er zunächst von der vollkommeneren oder unvollkommeneren Konsonanz der einzelnen Intervalle ab. Die Quarte hat sich weniger wohllautend erwiesen als die Quinte, die kleinen Terzen und Sexten weniger als die großen. Nun enthält der Akkord:

CEG Quinte.	Große Terz.	Kleine Terz.
EGC Quarte.	Kleine Terz.	Kleine Sexte.
GCE Quarte.	Große Terz.	Große Sexte.

CEs G Quinte.	Kleine Terz.	Große Terz.
Es GC Quarte.	Große Terz.	Große Sexte.
GCEs Quarte.	Kleine Terz.	Kleine Sexte.

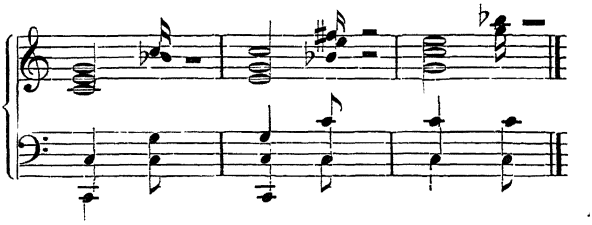
Da die Störungen des Wohllautes bei reinen Intervallen von den Terzen und Sexten entschieden bedeutender sind, als von den Quarten, so folgt hieraus, daß die Quartsextenlage des Durakkordes wohllautender ist als die fundamentale, und diese besser als die Sextenlage. Umgekehrt ist die Sextenlage beim Mollakkord besser als die fundamentale, und diese besser als die Quartsextenlage. Diese Folgerung erweist sich auch als durchaus richtig in den mittleren Lagen der Skala, wenn man wirklich reine Stimmung der Intervalle herstellt. Bei solchen Versuchen muß man aber die isoliert genommenen Akkorde ohne Modulation nebeneinander stellen. Sobald man modulatorische Verbindungen macht, die z. B. als Schlußkadenzen erscheinen können, stört das Gefühl für die Tonart, in deren Hauptakkord man Ruhe findet, die Beobachtung, auf die es hier ankommt. In den tieferen Lagen der Skala sind alle Terzen nachteiliger für den Wohlklang als die Sexten.

Nach der Art der Intervalle sollte man nun erwarten, daß der Mollakkord *CEs G* ebensogut klinge wie *CEG*, da beide Akkorde eine Quinte, eine große und eine kleine Terz enthalten. Indessen

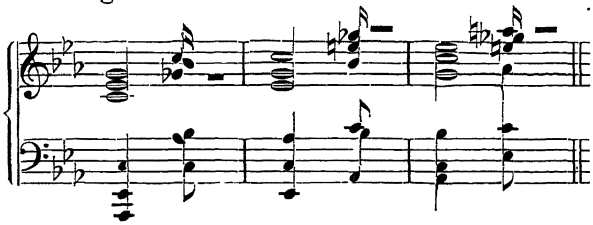
ist das keineswegs der Fall. Der Wohlklang des Mollakkordes ist merklich geringer, als der des Durakkordes, und zwar liegt der Grund in den Kombinationstönen, welche wir hier noch berücksichtigen müssen. Wir haben schon bei der Lehre vom Wohlklang der Intervalle gesehen, daß die Kombinationstöne Schwebungen hervorbringen können, wenn zwei Intervalle zusammengesetzt werden, deren jedes an sich keine, oder wenigstens keine deutlich hörbaren Schwebungen gibt.

Wir haben also noch die Kombinationstöne der Dur- und Molldreiklänge aufzusuchen. Wir beschränken uns auf die Kombinationstöne erster Ordnung, welche die Grundtöne und ihre ersten Obertöne geben. Die Grundtöne der Klänge sind mit halben Noten, die Kombinationstöne der Grundtöne mit Viertelnoten, die Kombinationstöne von Grundtönen mit ersten Obertönen mit Achteln und Sechzehnteln bezeichnet. Ein Strich neben einer Note bedeutet, daß sie etwas tiefer sein sollte, als der vorgezeichnete Skalenton.

1. Durdreiklänge mit den Kombinationstönen:



2. Molldreiklänge:



Bei den Durdreiklängen geben die Kombinationstöne erster Ordnung und selbst die tieferen Kombinationstöne zweiter Ordnung, welche als Achtelnoten bezeichnet sind, nur Verdoppelungen der Töne des Akkordes in den tieferen Oktaven. Die höheren Kombinationstöne zweiter Ordnung, welche als Sechzehnteile bezeichnet sind, sind außerordentlich schwach, da unter übrigens gleichen Umständen die

Intensität der Kombinationstöne abnimmt, wenn das Intervall der erzeugenden Töne zunimmt, womit wiederum die hohe Lage der betreffenden Kombinationstöne zusammenhängt. Ich habe die mit Achteln bezeichneten tieferen Kombinationstöne zweiter Ordnung am Harmonium mit Hilfe der Resonanzröhren stets leicht hören können, dagegen nicht die mit Sechzehnteln bezeichneten höheren. Der Vollständigkeit der Theorie wegen habe ich sie angegeben; es wäre auch nicht unmöglich, daß sie bei sehr starken Klängen mit starken Obertönen sich hörbar machten, für gewöhnlich können wir sie vernachlässigen.

Bei den Mollakkorden dagegen bringen schon die leicht hörbaren Kombinationstöne erster Ordnung Störungen hervor. Sie liegen zwar noch nicht so nahe aneinander, daß sie Schwebungen geben, aber sie liegen außer der Harmonie. Beim Grundakkord und Sextenakkord setzen diese Kombinationstöne, die mit Viertelnoten bezeichnet sind, einen *As*-Durdreiklang zusammen, beim Quartsextenakkord treten sogar zwei neue Töne, nämlich *As* und *B*, hinzu, die dem ursprünglichen Dreiklang fremd sind. Die Kombinationstöne zweiter Ordnung dagegen, welche mit Achtelnoten bezeichnet sind, kommen teils einander, teils den primären Tönen des Akkordes und den Kombinationstönen erster Ordnung so nahe, daß Schwebungen entstehen müssen, während diese Klasse von Tönen bei den Durakkorden sich noch vollständig in den Akkord einfügt. So finden wir zu dem fundamentalen Molldreiklang unseres Beispieles $c' - es' - g'$ durch die Kombinationstöne die Dissonanzen $as - b - c'$ gebildet; dieselben beim Sextenakkord $es' - g' - c''$. Und beim Quartsextenakkord $g' - c'' - es''$ finden wir die Dissonanzen $b - c'$ und $g' - as'$. Es sind diese Störungen im Wohlklang der Molldreiklänge durch die Kombinationstöne zweiter Ordnung allerdings zu schwach, um den genannten Akkorden den Charakter von Dissonanzen zu erteilen, aber sie bringen doch eine merkliche Vermehrung der Rauhigkeit im Vergleich mit Durakkorden auf rein, d. h. nach natürlichen Schwingungszahlen gestimmten Instrumenten hervor. In der gewöhnlichen temperierten Stimmung unserer Tasteninstrumente macht sich freilich diese Rauhigkeit der Kombinationstöne neben den viel größeren Rauhigkeiten, welche die ungenauen Konsonanzen hervorbringen, verhältnismäßig wenig bemerkbar. Praktisch scheint mir der Einfluß

der stärkeren tiefen Kombinationstöne erster Ordnung viel wichtiger, welche zwar nicht die Rauhigkeit des Zusammenklanges vermehren, aber zu dem Akkord fremde Töne hinzufügen, die bei den *C*-Mollakkorden dem *As*-Dur- und *Es*-Durdreiklang angehören. Dadurch kommt in die Mollakkorde etwas Fremdartiges hinein, was nicht deutlich genug ist, um die Akkorde ganz zu zerstören, was aber doch genügt, dem Wohlklang und der musikalischen Bedeutung dieser Akkorde etwas Verschleiertes und Unklares zu geben, dessen eigentlichen Grund sich der Hörer nicht zu entziffern weiß, weil die schwachen Kombinationstöne, welche die Ursache davon sind, von stärkeren anderen Tönen überdeckt werden, und nur einem geübten Ohr auffallen. Daher sind die Molldreiklänge so geeignet, unklare, trübe oder rauhe Stimmungen auszudrücken [1]). F. T. Vischer hat in seiner Ästhetik (Teil III, § 772) sehr gut diesen Charakter der Molltonart erörtert, wie sie zwar für mancherlei Abstufungen freudiger und schmerzlicher Aufregung passe, das Gemeinsame aller durch sie ausdrückbaren Stimmungen aber in dem „Verhüllten" und Unklaren liege.

Jede kleine Terz und jede Sexte wird, indem sich ihr Hauptkombinationston hinzugesellt, schon von selbst in einen Durakkord verwandelt. Zur kleinen Terz $e' - g'$ ist der Kombinationston C, zur großen Sexte $g - e'$ ist er c, zur kleinen Sexte $e' - c''$ ist er g. Durch alle diese Zweiklänge sind also schon Durdreiklänge natürlich vorgebildet, und sowie wir einen dritten Ton zu einem derselben hinzusetzen, der nicht in diesen schon fertig gebildeten Durdreiklang sich einfügt, so wird natürlich der Widerspruch fühlbar.

Die neueren Harmoniker sträuben sich meistenteils zuzugeben, daß der Mollakkord weniger konsonant sei als der Durakkord. Sie haben ihre Erfahrungen wohl ausschließlich an Instrumenten mit temperierter Stimmung gemacht, auf denen dieser Unterschied allerdings eher zweifelhaft bleiben kann. Bei rein gestimmten Intervallen dagegen [2]) und mäßig scharfer Klangfarbe ist der Unterschied sehr

[1]) Daß die Namen Dur und Moll nichts mit dem harten oder weichen Charakter der darin sich bewegenden Tonstücke zu tun haben, sondern sich nur auf die eckige und runde Form der Zeichen ♮ für unseren Ton *h* und ♭ für unseren Ton *b*, das *B durum* und *molle* der mittelalterlichen Notenschrift, beziehen, ist bekannt.

[2]) Über die Unterschiede der Stimmungen und ein Instrument mit reiner Stimmung, um solche Beobachtungen anzustellen, unten im fünfzehnten Abschnitt das Weitere.

auffallend und kann nicht weggeleugnet werden. Auch ist das Gefühl dafür bei den alten Tonsetzern des Mittelalters, welche fast ausschließlich für Gesang komponierten, und deshalb zu keiner Abschwächung der Konsonanzen gezwungen waren, wohl sehr entschieden entwickelt gewesen. Ich glaube, daß darin ein Hauptgrund für die Vermeidung des Mollakkordes am Schluß der Tonsätze gelegen hat. Man findet bei den mittelalterlichen Tonsetzern bis herab zu Sebastian Bach allgemein nur Durakkorde im Schluß gebraucht, oder Akkorde ohne Terz, und selbst noch bei Haendel und Mozart findet sich zuweilen ein Durakkord als Schluß eines Mollsatzes. Außer dem Grade der Konsonanz kommen in dem Schlußakkord allerdings auch noch andere Rücksichten in Betracht, nämlich die auf die deutliche Bezeichnung der herrschenden Tonika, welche dem Durakkord einen entschiedenen Vorzug gewähren. Darüber Näheres im fünfzehnten Abschnitt.

Nachdem wir die konsonanten Dreiklänge, welche den Umfang einer Oktave nicht überschreiten, aufgesucht und verglichen haben, wenden wir uns zu denen mit größeren Intervallen. Wir haben schon früher im allgemeinen als Regel gefunden, daß konsonante Intervalle konsonant bleiben, wenn man einen ihrer Töne beliebig um eine oder zwei Oktaven höher oder tiefer legt, wenn sich auch der Grad des Wohlklanges durch eine solche Umlagerung etwas verändert. Daraus folgt, daß auch in allen von uns bisher aufgestellten konsonanten Akkorden jeder einzelne Ton beliebig um ganze Oktaven höher oder tiefer gelegt werden kann. Waren die drei Intervalle des Dreiklanges vor der Umlagerung konsonant, so werden sie es auch nachher sein. Wir haben schon gesehen, daß die Sextenakkorde und Quartsextenakkorde auf diese Weise aus dem Stammakkord gewonnen werden konnten. Es folgt weiter daraus, daß auch in weiteren Intervallen keine anderen konsonanten Dreiklänge existieren können, als die, welche durch Umlagerung der Dur- und Molldreiklänge erzeugt sind. Denn wenn es dergleichen Akkorde gäbe, würde man ihre Töne so umlagern können, daß sie innerhalb der Grenzen einer Oktave lägen, und man würde dadurch einen neuen konsonanten Akkord innerhalb der Oktave erhalten; ein solcher kann aber nicht existieren, da wir durch unsere Methode, die dreistimmigen konsonanten Akkorde aufzusuchen, alle, welche es

überhaupt innerhalb einer Oktave geben kann, gefunden haben müssen. Allerdings können schwach dissonante Akkorde, die innerhalb einer Oktave liegen, durch Umlagerung ihrer Töne zuweilen eine geringere Rauhigkeit erhalten. So ist der Akkord $1 : {}^7\!/_6 : {}^7\!/_4$ oder *C*, *Es*_, *B*_ wegen des Intervalles $1 : {}^7\!/_6$ schwach dissonant; das Intervall $1 : {}^7\!/_4$, die natürliche Septime, klingt nicht schlechter als die kleine Sexte; das Intervall $ {}^7\!/_6 : {}^7\!/_4$ ist eine reine Quinte. Legt man nun den Ton *Es*_ eine Oktave höher nach *es*_, so daß der Akkord ist

$$1 : {}^7\!/_4 : {}^7\!/_3,$$

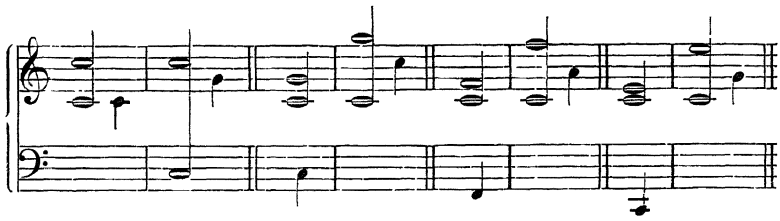
so ist $1 : {}^7\!/_3$ ein viel milderes Intervall als $1 : {}^7\!/_6$, es klingt selbst besser als die kleine Dezime unserer Molltonleiter $1 : {}^{12}\!/_5$, und der so zusammengesetzte Akkord, den ich mir auf dem Harmonium genau abgestimmt habe, klingt zwar fremdartig, wegen der ungewöhnlichen Intervalle, aber nicht eben rauher als der schlechteste der Mollakkorde, nämlich der Mollquartsextenakkord. Auch jener Akkord *C*, *B*_, *es*_ wird übrigens durch unpassende Kombinationstöne G_1 und *F* sehr gestört. Natürlich würde es nicht lohnen, zugunsten eines einzelnen solchen Akkordes, der sich doch nur den schlechtesten unserer jetzigen konsonanten Akkorde an die Seite stellt und nicht umgelegt werden kann, die in ihm enthaltenen Töne, die der gewöhnlichen Tonleiter fremd sind, in diese einführen zu wollen.

Bei den Umlagerungen der konsonierenden Dreiklänge in weitere Intervalle verändert sich ihr Wohlklang zunächst durch Änderung der Intervalle. Große Dezimen sind, wie wir im vorigen Abschnitt gefunden haben, wohlklingender als große Terzen, kleine Dezimen schlechter als kleine Terzen, die um eine Oktave vermehrten Sexten (Tredezimen) schlechter als die unveränderten Sexten, namentlich die kleinen. Um diese Tatsachen zu merken, beachte man folgende Regel: Es verbessern sich bei der Erweiterung um eine Oktave alle diejenigen Intervalle, in deren Zahlenverhältnis die niedere Zahl gerade ist, weil bei der Erweiterung das Zahlenverhältnis einfacher wird.

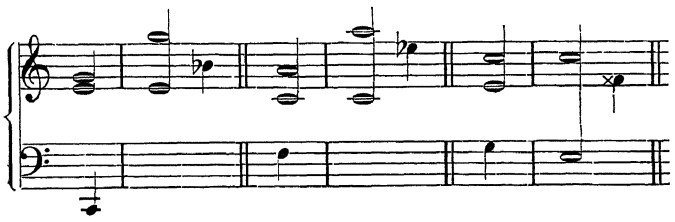
Quinte . . . . . 2:3 wird zur Duodezime . . 2: 6 = 1:3
Terz . . . . . 4:5 wird zur Dezime . . . . 4:10 = 2:5
Verminderte Terz . 6:7 wird zur verminderten Dezime 3:7

Es verschlechtern sich dagegen im Klang diejenigen Intervalle bei der Erweiterung um eine Oktave, deren niedere Zahl ungerade ist, wie die Quarte 3:4, die kleine Terz 5:6, die Sexten 3:5 und 5:8.

Außerdem kommt es aber noch wesentlich auf die Hauptkombinationstöne der betreffenden Intervalle an. Ich gebe hier noch einmal eine Zusammenstellung der ersten Kombinationstöne derjenigen konsonanten Intervalle, welche innerhalb des Umfanges von zwei Oktaven liegen. Die primären Töne sind wieder mit halben Noten bezeichnet, die Kombinationstöne mit Viertelnoten.



Verhältnis:	1:2	1:4	2:3	1:3	3:4	3:8	4:5	2·5
Differenz:	1	3	1	2	1	5	1	3



5:6	5:12	3:5	3:10	5:8	5:16
1	7	2	7	3	11

Das Zeichen × bedeutet hierin eine Erhöhung um etwas weniger als einen halben Ton; die Töne *b* und *es* sind natürliche Septimen von *c* und *f*. Unter den Notenlinien sind die Zahlenverhältnisse der darüber stehenden Intervalle angegeben, die Differenz der beiden Zahlen gibt die Schwingungszahl des betreffenden Kombinationstones.

Wir finden zunächst, daß die Kombinationstöne der Oktave, Quinte, Duodezime, Quarte und großen Terz nur Oktaven-

verdoppelungen eines der primären Töne sind, also jedenfalls dem Akkord keinen neuen Ton hinzufügen. Die fünf genannten Intervalle können also in allen Arten konsonanter Akkorde gebraucht werden, ohne daß eine Störung durch ihre Kombinationstöne entsteht. In dieser Beziehung steht also wirklich die große Terz in der Akkordbildung der großen Sexte und Dezime voraus, obgleich sie von beiden letzteren im Wohlklang übertroffen wird.

Die Doppeloktave bringt als Kombinationston eine Quinte hinein. Wird also der Grundton des Akkordes in der Doppeloktave verdoppelt, so stört dies den Akkord nicht. Wohl aber würde eine Störung eintreten, wenn die Terz oder Quinte des Akkordes in der Doppeloktave verdoppelt würde.

Dann finden wir eine Reihe von Intervallen, welche sich durch ihren Kombinationston zum Durakkord ergänzen und deshalb im Durakkord keine Störung machen, wohl aber im Mollakkord. Es sind dies die Undezime, kleine Terz, große Dezime, große Sexte, kleine Sexte.

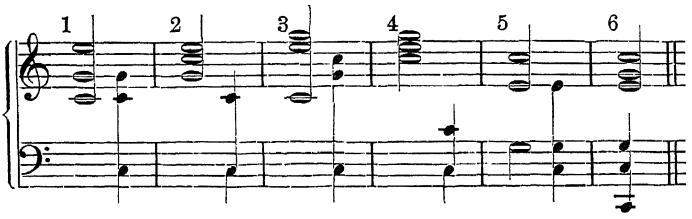
Dagegen passen die kleinen Dezimen und die beiden Tredezimen in keinen konsonanten Akkord hinein, ohne durch ihre Kombinationstöne zu stören.

Wenden wir nun diese Betrachtungen an auf die Konstruktion zunächst der dreistimmigen Akkorde.

1. Dreistimmige Durakkorde.

Durakkorde lassen sich so anordnen, daß die Kombinationstöne ganz innerhalb des Akkordes bleiben. Es gibt dies die vollkommen wohlklingenden Lagen der Akkorde. Um sie zu finden, berücksichtige man, daß keine kleinen Dezimen und keine Tredezime vorkommen dürfen, daß also die kleinen Terzen und alle Sexten enge Lagen haben müssen. Indem man erst die Terz, dann die Quinte, dann den Grundton zur Oberstimme macht, findet man folgende durch Kombinationstöne nicht gestörte Lagen dieser Akkorde, welche die Breite zweier Oktaven nicht überschreiten und hier mit Angabe der Kombinationstöne in Viertelnoten folgen:

Vollkommenste Lagen der dreistimmigen Durakkorde.



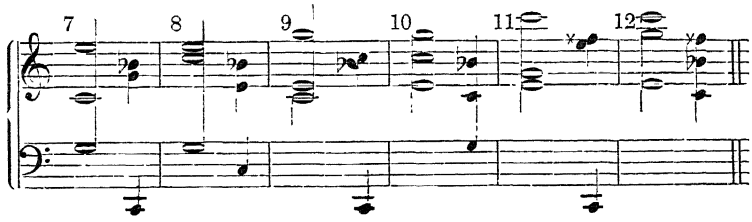
Wenn die Terz oben liegt, darf die Quinte nicht tiefer unter ihr liegen als eine große Sexte, weil wir sonst eine Tredezime erhalten würden; der Grundton aber kann wechseln. Deshalb gibt es bei der Terz in der Oberstimme nur die beiden Lagen 1 und 2, welche ungestört sind. Wenn die Quinte oben liegt, muß die Terz unmittelbar unter ihr liegen, sonst erhalten wir eine kleine Dezime; der Grundton kann wechseln. Endlich, wenn der Grundton oben liegt, darf die Terz nur in kleiner Sexte unter ihm liegen, die Quinte ist frei. Daraus ergibt sich, daß es keine anderen Lagen des Durakkordes gibt, welche frei von allen störenden Kombinationstönen sind, als die hier verzeichneten, unter denen wir die drei schon oben besprochenen engen Lagen 2, 4 und 6 wiederfinden, und drei neue weitere, nämlich 1, 3 und 5. Von diesen neuen Lagen haben zwei, 1 und 3, den Grundton im Baß, wie der Stammakkord, und werden als weitere Lagen des letzteren angesehen, eine hat die Quinte unten, nämlich 5, wie der Quartsextenakkord 2. Der Sextenakkord 6 erhält dagegen keine weitere Lage.

Dem Wohlklang der Intervalle nach ist die Reihenfolge jener Akkorde etwa auch die oben gegebene. Die drei Intervalle der ersten, nämlich Quinte, große Dezime und große Sexte, sind die besten, die der letzten, nämlich Quarte, kleine Terz und kleine Sexte, verhältnismäßig die ungünstigsten der hier vorkommenden Intervalle.

Die übrigen Lagen der dreistimmigen Durakkorde geben nun zwar einzelne unpassende Kombinationstöne und klingen auf rein gestimmten Instrumenten merklich rauher als die bisher betrachteten, aber sie werden dadurch noch nicht dissonant, sondern rücken nur in dieselbe Kategorie mit den Mollakkorden. Man erhält sie alle, soweit sie innerhalb des Umfanges von zwei Oktaven liegen, wenn

man die vorher verbotenen Umlagerungen macht. Es sind folgende, der Reihe nach aus 1 bis 6 erzeugt:

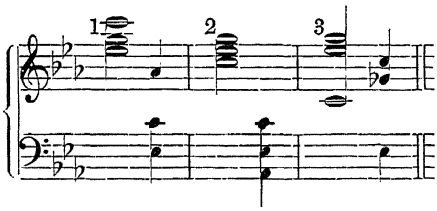
Unvollkommenere Lagen der dreistimmigen Durakkorde.



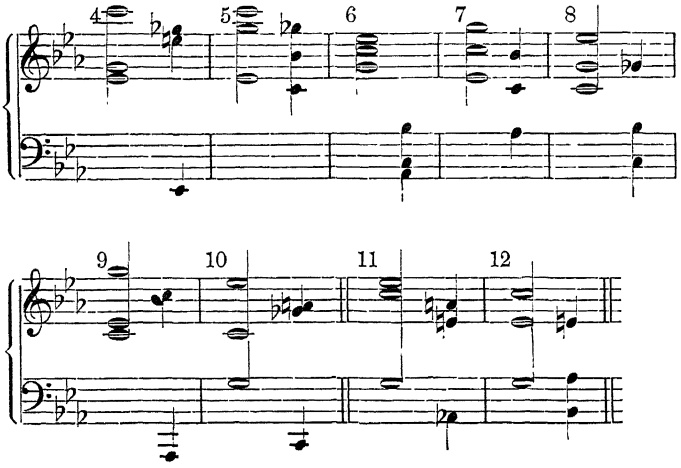
Musiker werden sogleich übersehen, daß dies die weniger gebrauchten Lagen der Durakkorde sind; die Lagen 7 bis 10 bekommen durch ihren Kombinationston *b* eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Dominantseptimenakkord der *F*-Durtonart *c*—*e*—*g*—*b*; am wenigsten angenehm sind die beiden letzten, 11 und 12, welche in der Tat merklich rauher klingen als die besseren Mollakkorde.

2. Dreistimmige Mollakkorde.

Die Mollakkorde lassen sich nie ganz frei von falschen Kombinationstönen halten, weil man ihre Terz nie in eine Stellung zum Grundton bringen kann, wo sie nicht einen für den Mollakkord unpassenden Kombinationston hervorbringt. Soll dieser der einzige bleiben, so müssen die beiden Töne *Es* und *G* des *C*-Mollakkordes ihre engste Lage als große Terz behalten, weil sie in jeder anderen Lage einen zweiten unpassenden Kombinationston hervorbringen würden. Die beiden Töne *C* und *G* müssen nur das Intervall der Undezime vermeiden, wo sie sich zum Durakkord vervollständigen würden. Unter diesen Bedingungen sind nur drei Lagen des Mollakkordes möglich, nämlich folgende:



Die übrigen Lagen, welche weniger gut klingen, sind folgende:



Die Lagen 4 bis 10 enthalten je zwei unpassende Kombinationstöne, deren einer notwendig von den Tönen *C* und *Es* hervorgebracht wird, deren zweiter in 4 von der Undezime *G* — *C*, in den übrigen von der umgelegten großen Terz *Es* — *G* herrührt. Die beiden letzten Lagen 11 und 12 klingen am schlechtesten, weil sie je drei falsche Kombinationstöne haben.

Der Einfluß der Kombinationstöne gibt sich auch bei der Vergleichung der verschiedenen Lagen zu erkennen. So klingt die Lage 3 mit einer kleinen Dezime und großen Terz entschieden besser als die Lage 7 mit großer Dezime und großer Sexte, obgleich die beiden letzteren Intervalle einzeln genommen besser klingen als die beiden ersten. Der schlechtere Klang des Akkordes 7 wird also allein durch den zweiten unpassenden Kombinationston verursacht.

Auch im Vergleich mit den Durakkorden zeigt sich der Einfluß der schlechten Kombinationstöne. Wenn man die Mollakkorde 1 bis 3, von denen jeder nur einen schlechten Kombinationston hat, vergleicht mit den Durakkorden 11 und 12, die deren je zwei haben, so klingen in der Tat jene Mollakkorde angenehmer und weniger rauh als die genannten Durakkorde. Es ist also auch bei diesen beiden Klassen von Akkorden nicht die große oder kleine Terz, noch das Tongeschlecht, welche über den Wohlklang entscheiden, sondern es sind die Kombinationstöne, die es tun.

Vierstimmige Akkorde.

Es ist leicht einzusehen, daß alle konsonanten vierstimmigen Akkorde immer wieder Durakkorde oder Mollakkorde sein werden, von denen ein Ton in der Oktave verdoppelt ist. Denn jeder konsonante vierstimmige Akkord muß sich in einen konsonanten dreistimmigen verwandeln, so oft wir einen seiner Töne wegnehmen. Dies können wir in verschiedener Weise tun, indem wir nacheinander verschiedene Töne des vierstimmigen Akkordes wegnehmen. Aus dem vierstimmigen Akkord *C—E—G—c* z. B. können wir folgende dreistimmige entnehmen:

C—E—G *E—G—c*
C—E—c *C—G—c.*

Sämtliche so entstandene dreistimmige konsonante Akkorde müssen aber, wenn sie nicht schon verdoppelte Noten enthalten, entweder Durakkorde oder Mollakkorde sein, da es keine anderen dreistimmigen konsonanten Akkorde gibt. Wenn wir aber einem Durdreiklang oder Molldreiklang wieder einen vierten Ton zusetzen wollen, so daß er sich in einen vierstimmigen konsonanten Akkord verwandelt, so kann das nur geschehen durch Verdoppelung eines seiner drei Töne. Denn jeder solcher Akkord enthält zwei Töne, wir wollen sie *C* und *G* nennen, die zueinander im Verhältnis einer einfachen oder umgelagerten Quinte stehen. Die einzigen Töne aber, welche mit den Tönen *C* und *G* zu konsonanten Akkorden sich verbinden lassen, sind *E* und *Es*; andere existieren nicht. Da nun *E* und *Es* nicht zusammen in einem konsonanten Akkord vorkommen können, so kann jeder konsonante vierstimmige oder auch mehrstimmige Akkord, der *C* und *G* enthält, entweder noch *E* enthalten, und Verdoppelungen dieser drei Töne, oder er kann statt *E* den Ton *Es* und dessen Verdoppelungen enthalten.

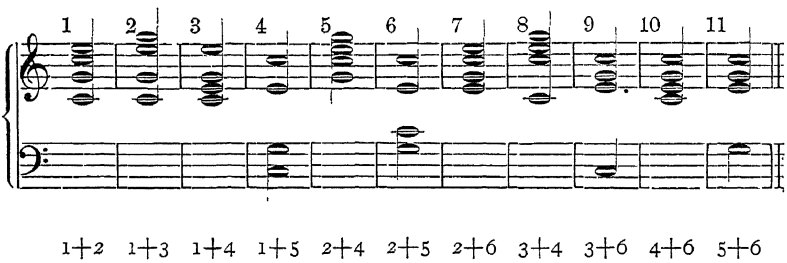
Alle drei- und mehrstimmigen konsonanten Akkorde sind also entweder Durakkorde oder Mollakkorde, und können aus den beiden Stammakkorden der Dur- und Molltonart abgeleitet werden durch Umlegung und Verdoppelung ihrer drei Töne in Oktaven.

Um die vollkommen gut klingenden Lagen der vierstimmigen Durakkorde zu finden, haben wir wieder darauf zu sehen, daß keine

kleinen Dezimen und keine Tredezimen vorkommen. Die Quinte darf sich also von der Terz des Akkordes nach oben nicht weiter als eine kleine Terz, nach unten nicht weiter als eine Sexte entfernen, der Grundton nach oben nicht weiter als eine Sexte. Wenn diese Regeln erfüllt sind, so ist zugleich die andere oben erwähnte Forderung erfüllt, daß Terz und Quinte nicht in der Doppeloktave verdoppelt werden dürfen. Diese Regeln lassen sich kurz gefaßt so aussprechen: Am wohlklingendsten sind diejenigen Durakkorde, in denen der Grundton nach oben, die Quinte nach oben und nach unten nicht über eine Sexte von der Terz entfernt sind. Nach unten dagegen kann der Grundton sich so weit entfernen, als er will.

Man findet die hierher gehörenden Lagen der Durakkorde, wenn man von den vollkommensten Lagen der dreistimmigen Akkorde je zwei, welche zwei gemeinsame Töne haben, zusammensetzt. Sie folgen hier:

Vollkommenste Lagen der vierstimmigen Durakkorde im Umfang zweier Oktaven.



Die Ziffern unter den Notenreihen beziehen sich auf die oben angegebenen Lagen der dreistimmigen Durakkorde.

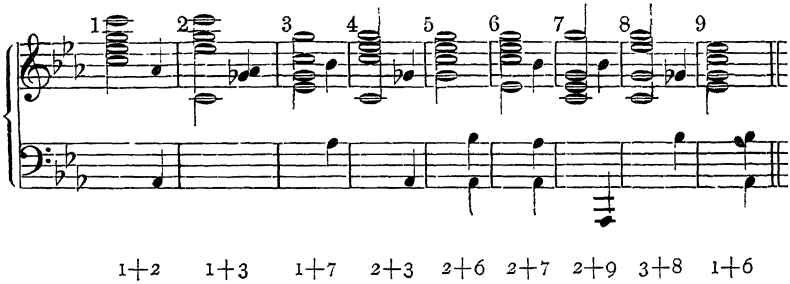
Man sieht, daß die Sextenakkorde ganz eng liegen müssen, wie Nr. 7; die Quartsextenakkorde dürfen nicht über den Umfang einer Undezime hinausgehen, kommen aber in allen drei Lagen (5, 6 und 11) vor, welche innerhalb einer Undezime möglich sind. Am freiesten sind die Akkorde, welche den Grundton im Baß haben.

Es wird nicht nötig sein, die weniger gut klingenden Lagen der Durakkorde hier anzuführen. Die Zahl der schlechten Kombina-

tionstöne kann nicht über zwei steigen, wie sie in der Lage 11 der dreistimmigen Akkorde enthalten sind. Es sind in den dreistimmigen *C*-Durakkorden ja überhaupt nur die beiden falschen Kombinationstöne *b* und *f*× enthalten.

Vierstimmige Mollakkorde müssen, wie die entsprechenden dreistimmigen, natürlich immer mindestens einen falschen Kombinationston haben. Es gibt aber nur eine einzige Lage des vierstimmigen Mollakkordes, welche nicht mehr als einen hat, nämlich die in dem folgenden Notenbeispiel mit 1 bezeichnete, welche aus den Lagen 1 und 2 des dreistimmigen Mollakkordes zusammengesetzt ist. Die Zahl der falschen Kombinationstöne kann bis auf vier steigen, wenn man z. B. die Lagen 10 und 11 der dreistimmigen Akkorde miteinander verbindet. Ich lasse hier die Übersicht der vierstimmigen Mollakkorde folgen, welche nicht über zwei falsche Kombinationstöne haben und innerhalb des Umfanges von zwei Oktaven bleiben. Es sind nur die falschen Kombinationstöne in Viertelnoten angegeben; die, welche in den Akkord passen, sind weggelassen.

Beste Lagen der vierstimmigen Mollakkorde.



Der Quartsextenakkord kommt nur in engster Lage vor, Nr. 5, der Sextenakkord in drei Lagen (9, 3 und 6), nämlich in allen den Lagen, welche den Umfang einer Dezime nicht überschreiten, der Stammakkord dreimal mit verdoppelter Oktave (1, 2, 4) und zweimal mit verdoppelter Quinte (8 und 8).

In der bisherigen musikalischen Theorie ist wenig genug über den Einfluß der Umlagerungen der Akkorde auf ihren Wohlklang gesagt worden. Man gibt gewöhnlich die Regel, im Baß nicht die

engeren Intervalle zu gebrauchen und die Intervalle ziemlich gleichmäßig über den Zwischenraum der äußersten Töne zu verteilen, und auch diese Regeln erscheinen nicht als Konsequenzen der gewöhnlich gegebenen theoretischen Ansichten und Gesetze, in denen ein konsonantes Intervall gleichmäßig konsonant bleibt, in welchem Teil der Skala es auch liegen, wie es auch umgelagert und verbunden sein mag, sondern mehr als praktische Ausnahmen von den allgemeinen Regeln. Es blieb eben dem Musiker überlassen, sich durch Übung und Erfahrung von dem verschiedenartigen Eindruck der verschieden umgelagerten Akkorde eine Anschauung zu verschaffen. Man wußte ihm darüber keine Regel zu geben.

Ich habe den vorliegenden Gegenstand so weit ausgeführt, wie es hier geschehen ist, um zu zeigen, daß wir durch die richtige Einsicht in den Grund der Konsonanz und Dissonanz auch Regeln gewinnen können über Verhältnisse, welche die bisherige Harmonielehre noch nicht in Regeln zu fassen wußte. Daß unsere hier aufgestellten Behauptungen aber mit der Praxis der besten Komponisten übereinstimmen, namentlich derjenigen, welche ihre musikalischen Studien noch hauptsächlich an der Vokalmusik gemacht haben, ehe die größere Ausbildung der Instrumentalmusik zur allgemeinen Einführung der temperierten Stimmung zwang, davon wird man sich bei der Durchsicht solcher Kompositionen, welche den Eindruck vollkommensten Wohlklanges erstreben, leicht überzeugen. Unter allen Komponisten ist Mozart wohl derjenige, welcher für die Feinheiten der Technik den sichersten Instinkt gehabt hat. Unter seinen Vokalkompositionen ist wegen seines wunderbar reinen und weichen Wohlklanges besonders berühmt sein *Ave verum corpus.* Sehen wir diesen kleinen Satz als eines der geeignetesten Beispiele für unseren Zweck durch, so finden wir in seinem ersten Absatz, der ungemein weich und süß klingt, Durakkorde untermischt mit Septimenakkorden. Alle diese Durakkorde gehören den von uns als vollkommen wohlklingend bezeichneten Akkorden an. Am meisten kommt die Lage 2 vor, demnächst 8, 10, 1 und 9. Erst in der Schlußmodulation dieses ersten Absatzes kommen zwei Mollakkorde und ein Durakkord in ungünstiger Lage vor. Im Vergleich damit ist es nun sehr auffallend, wie im zweiten Absatz desselben Stückes, dessen Ausdruck mehr verschleiert, sehnsüchtig und mystisch ist, und dessen Modulation sich durch kühnere

Übergänge und härtere Dissonanzen hindurcharbeitet, viel mehr Mollakkorde vorkommen, und diese sowohl wie die eingestreuten Durakkorde überwiegend in ungünstige Lagen gebracht sind, bis im Schlußakkord wieder der volle Wohlklang erscheint.

Ganz ähnliche Beobachtungen kann man machen an den Chorsätzen des Palestrina und seiner Zeitgenossen und Nachfolger, soweit dieselben einen einfach harmonischen Bau ohne verwickelte Polyphonie haben. Es wurde bei der Umformung der römischen Kirchenmusik, welche Palestrina auszuführen hatte, der hauptsächlichste Nachdruck auf den Wohlklang, im Gegensatz gegen die herbe und schwer verständliche Polyphonie der älteren niederländischen Weise gelegt, und in der Tat hat Palestrina und seine Schule diese Aufgabe in der vollendetesten Weise gelöst. Man findet auch hier eine fast ununterbrochene Folge konsonanter Akkorde mit sparsam eingestreuten Septimen oder dissonanten Durchgangsnoten. Auch hier bestehen die konsonanten Akkorde ganz oder fast ausschließlich aus denjenigen Dur- und Mollakkorden, welche wir als die wohlklingenderen bezeichnet haben. Nur in den Schlußkadenzen der einzelnen Absätze finden sich mit stärkeren und gehäufteren Dissonanzen gemischt überwiegend die ungünstigeren Lagen der Dur- und Mollakkorde, so daß der Ausdruck in der Harmonie, den die neuere Musik durch verschiedenartige dissonante Akkorde, namentlich die reichliche Einmischung der Septimenakkorde erreicht, in der Schule von Palestrina durch die viel zarteren Schattierungen der verschieden umgelagerten konsonanten Akkorde gewonnen wird. Dadurch erklärt sich der doch mit tiefem und zartem Ausdruck verbundene Wohlklang dieser Kompositionen, welche wie Gesang von Engeln klingen, deren Herz durch irdischen Schmerz zwar bewegt, aber nicht in seiner himmlischen Heiterkeit getrübt wird. Natürlich fordern solche Tonsätze sowohl vom Sänger wie vom Hörer ein feines Ohr, damit die feinen Abstufungen des Ausdruckes zu ihrem Recht kommen, da wir durch die moderne Musik an kräftigere und drastischere Ausdrucksmittel gewöhnt sind.

Von vierstimmigen Durakkorden finde ich in Palestrinas *Stabat mater* überwiegend gebraucht die Lagen 1, 10, 8, 5, 3, 2, 4, 9, von Mollakkorden die Lagen 9, 2, 4, 8, 3, 5, 1. Bei den Durakkorden könnte man vielleicht noch glauben, daß ihn irgend eine theoretische

Regel geleitet habe, die schlechten Intervalle der kleinen Dezime oder der Tredezimen zu vermeiden. Aber für die Mollakkorde würde eine solche Regel ganz und gar nicht passen. Da man damals von den Kombinationstönen noch nichts wußte, müssen wir schließen, daß ihn nur sein feines Ohr geleitet hat, und daß sein Ohr in genauer Übereinstimmung mit den von uns theoretisch abgeleiteten Regeln geurteilt hat.

Die angeführten Autoritäten mögen vor den Musikern die Richtigkeit meiner Einteilung der konsonanten Akkorde nach ihrem Wohlklang rechtfertigen. Übrigens kann man sich auch jeden Augenblick von ihrer Richtigkeit an jedem nach reinen Intervallen gestimmten Instrument überzeugen. Bei der jetzt gewöhnlichen Stimmung in temperierten Intervallen werden allerdings die feineren Unterschiede etwas verwischt, ohne daß sie jedoch ganz verschwinden.

Indem wir hiermit denjenigen Teil der Untersuchungen abgeschlossen haben, welcher auf rein naturwissenschaftlichen Prinzipien beruht, wird es ratsam sein, einen Rückblick auf den zurückgelegten Weg zu werfen, um zu übersehen, was wir gewonnen haben, und in welchem Verhältnis unsere Ergebnisse zu den Ansichten älterer Theoretiker stehen. Wir sind ausgegangen von den akustischen Phänomenen der Obertöne, der Kombinationstöne und der Schwebungen. Diese Phänomene waren längst bekannt, sowohl den Musikern wie den Akustikern; auch die Gesetze, nach denen sie zustande kommen, waren in ihren wesentlichen Zügen richtig erkannt und aufgestellt worden. Es war für uns nur nötig, diese Erscheinungen weiter in das einzelne zu verfolgen, als es bisher geschehen war. Es ist uns gelungen, Methoden für die Beobachtung der Obertöne aufzufinden, welche das bisher so schwierige Geschäft verhältnismäßig leicht machen. Mit Hilfe dieser Methoden haben wir uns bemüht zu zeigen, daß mit wenigen Ausnahmen die Klänge aller musikalischen Instrumente von Obertönen begleitet sind, daß namentlich diejenigen Klangfarben, welche für musikalische Zwecke besonders günstig sind, wenigstens eine Reihe der niederen Obertöne in ziemlich großer Stärke besitzen; daß dagegen die einfachen Töne, wie die der gedackten Orgelpfeifen, eine sehr wenig befriedigende musikalische Wirkung machen, obgleich auch zu diesen, wenigstens wenn sie einigermaßen stark er-

klingen, im Ohr selbst sich noch schwache harmonische Obertöne gesellen. Dagegen fanden wir, daß bei den besseren musikalischen Klangfarben die hohen Partialtöne, etwa vom siebenten ab, schwach sein müssen, weil sonst die Klangfarbe und namentlich jeder Zusammenklang zu scharf wird. In bezug auf die Schwebungen war es namentlich unsere Aufgabe nachzuweisen, was aus den Schwebungen wird, wenn man sie schneller und schneller werden läßt. Wir fanden, daß sie dann in die der Dissonanz eigentümliche Rauhigkeit übergehen; es läßt sich dieser Übergang ganz allmählich bewirken, in allen seinen Stadien beobachten, und es ergibt sich dabei selbst der einfachsten sinnlichen Beobachtung leicht und klar, daß das Wesen der Dissonanz eben nur auf sehr schnellen Schwebungen beruht. Diese sind für den Gehörnerven rauh und unangenehm, weil jede intermittierende Erregung unsere Nervenapparate heftiger angreift als eine gleichmäßig andauernde. Dazu gesellt sich vielleicht noch als psychologisches Motiv, daß wir zwar durch die einzelnen Tonstöße eines dissonanten Zusammenklanges den Eindruck einer Folge von Stößen ebenso erhalten, wie durch langsamere Schwebungen, sie jedoch nicht mehr einzeln als getrennt erkennen und zählen können; sie bilden deshalb eine wirre Tonmasse, die wir nicht in ihre einzelnen Elemente klar zerlegen können. In dem Rauhen und in dem Wirren der Dissonanz glauben wir den Grund ihrer Unannehmlichkeit zu erkennen. Wir können den Sinn dieses Unterschiedes kurz so bezeichnen: Konsonanz ist eine kontinuierliche, Dissonanz eine intermittierende Tonempfindung. Zwei konsonierende Töne fließen in ruhigem Fluß nebeneinander hin, ohne sich gegenseitig zu stören, dissonierende zerschneiden sich in eine Reihe einzelner Tonstöße. Es entspricht diese unsere Beschreibung der Sache vollkommen der alten Definition des Euklides: „Konsonanz ist die Mischung zweier Töne, eines höheren und eines tieferen. Dissonanz aber ist im Gegenteil die Unfähigkeit zweier Töne, sich zu mischen, daher sie für das Gehör rauh werden“ [1]).

Nachdem dieses Prinzip einmal gefunden war, blieb weiter nichts zu tun übrig, als zu untersuchen, in welchen Fällen und wie stark

[1]) Euclides, ed. Meibomius, p. 8: *Ἔστι δὲ συμφωνία μὲν κρᾶσις δύο φθόγγων, ὀξυτέρου καὶ βαρυτέρου. Διαφωνία δὲ τοὐναντίον δύο φθόγγων ἀμιξία, μὴ οἷων τε κραθῆναι, ἀλλὰ τραχυνθῆναι τὴν ἀκοήν.*

Schwebungen bei den verschiedenen möglichen Zusammenklängen teils durch die Partialtöne, teils durch die Kombinationstöne verschiedener Ordnung entstehen müssen. Diese Untersuchung war bisher eigentlich nur von Scheibler für die Kombinationstöne je zweier einfacher Töne durchgeführt worden; die bekannten Gesetze der Schwebungen machten es möglich, sie auch ohne Schwierigkeit für die zusammengesetzten Klänge durchzuführen. Jede Folgerung der Theorie auf diesem Gebiet kann jeden Augenblick durch eine richtig angestellte Beobachtung bewahrheitet werden, namentlich wenn man sich die Analyse der Klangmasse durch Anwendung der Resonatoren erleichtert. Alle diese Schwebungen der Obertöne und Kombinationstöne, von denen wir in den letzten Abschnitten soviel gesprochen haben, sind nicht Erfindungen leerer theoretischer Spekulationen, sie sind vielmehr Tatsachen der Beobachtung und können von jedem geübten Beobachter bei richtiger Anstellung des Versuches ohne Schwierigkeit wirklich wahrgenommen werden. Die Kenntnis des akustischen Gesetzes erleichtert es uns, die Erscheinungen, um die es sich handelt, schneller und sicherer aufzufinden. Aber alle die Behauptungen, auf die wir gefußt haben, um die Lehre von den Konsonanzen und Dissonanzen so hinzustellen, wie sie in den letzten Abschnitten gegeben ist, begründen sich ganz allein auf eine sorgfältige Analyse der Gehörempfindungen, welche Analyse durch jedes geübte Ohr ohne alle Hilfe der Theorie hätte ausgeführt werden können, die aber allerdings im Leitfaden der Theorie und durch die Hilfe zweckmäßiger Beobachtungsmittel außerordentlich viel leichter geworden ist, als sie sonst gewesen wäre.

Namentlich bitte ich den Leser auch zu bemerken, daß die Hypothese über das Mitschwingen der Cortischen Organe des Ohres mit der Erklärung der Konsonanz und Dissonanz gar nichts unmittelbar zu tun hat. Letztere gründet sich allein auf Tatsachen der Beobachtung, auf die Schwebungen der Partialtöne und die Schwebungen der Kombinationstöne. Doch glaubte ich die genannte Hypothese, welche wir natürlich nicht aufhören dürfen als solche zu betrachten, nicht unterdrücken zu müssen, weil sie alle die verschiedenen akustischen Phänomene, mit denen wir es zu tun hatten, unter einem Gesichtspunkt zusammenfaßt und für sie alle zusammen eine klar verständliche und anschauliche Erklärung gibt.

Die letzten Abschnitte haben gezeigt, daß die richtig und sorgfältig angestellte Analyse der Klangmasse unter Benutzung der angeführten Prinzipien genau zu denselben Unterschieden konsonanter und dissonanter Intervalle und Akkorde führt, wie sie von der bisherigen musikalischen Harmonielehre aufgestellt worden sind. Wir haben sogar gezeigt, daß unsere Untersuchungen noch speziellere Auskunft über einzelne Intervalle und Akkordformen geben, als es die allgemeinen Regeln der bisherigen Harmonielehre zu tun imstande waren, und sowohl die Beobachtung an rein gestimmten Instrumenten, als das Beispiel der besten Komponisten bestätigte unsere Folgerungen in dieser Beziehung.

Somit stehe ich nicht an zu behaupten, daß in den vorliegenden Untersuchungen die wahre und ausreichende Ursache des konsonanten und dissonanten Verhaltens der musikalischen Klänge dargelegt worden sei, gegründet auf eine genauere Analyse der Tonempfindungen und auf rein naturwissenschaftliche, nicht auf ästhetische Prinzipien.

Ein Punkt könnte den Musiker vielleicht bedenklich machen. Wir haben gefunden, daß von den vollkommensten Konsonanzen zu den entschiedenen Dissonanzen hin eine kontinuierliche Reihe von Stufen existiert, von Zusammenklängen, die immer rauher und rauher werden, so daß hiernach keine scharfe Trennung der Konsonanzen und Dissonanzen bestehen würde, und es ziemlich willkürlich erscheint, wo wir die Grenze zwischen ihnen zu ziehen geneigt sind. Die Musiker machen dagegen eine scharfe Trennung zwischen Konsonanzen und Dissonanzen, und lassen keine Zwischenglieder zwischen ihnen zu, wie dies auch Hauptmann als einen Hauptgrund gegen jede Ableitung der Theorie der Konsonanz aus den rationellen Zahlenverhältnissen hervorhebt [1]).

In der Tat haben wir schon oben bemerkt, daß die Zusammenklänge der natürlichen Septime 4:7 und der verminderten Dezime 3:7 in vielen Klangfarben mindestens ebensogut klingen, wie die kleine Sexte 5:8, und daß das letztere Intervall 3:7 sogar meistens besser klingt, als die ziemlich unvollkommene Konsonanz der kleinen Dezime 5:12. Aber wir haben schon einen für die musikalische Praxis sehr wichtigen Umstand angeführt, durch welchen die kleine Sexte vor

[1]) Harmonik und Metrik, S. 4.

den mit der Zahl 7 gebildeten Intervallen einen Vorzug hat. Die kleine Sexte gibt nämlich durch ihre Umkehrung ein besseres Intervall, die große Terz, und ihre Bedeutung als Konsonanz im heutigen Musiksystem hat sie besonders durch diese ihre Beziehung zur großen Terz; sie ist wesentlich notwendig und berechtigt, nur weil sie Umkehrung der großen Terz ist. Die durch die Zahl 7 gebildeten Intervalle dagegen geben durch ihre Umkehrungen und Umlagerungen nur schlechtere Intervalle, als sie selbst sind. Das Bedürfnis der Harmonik, die Stimmen nach Belieben umlegen zu dürfen, würde also schon ein Motiv abgeben können, zwischen der kleinen Sexte einerseits und den durch die Zahl 7 bestimmten Intervallen andererseits die Grenze zu ziehen. Entscheidend für diese Grenze ist übrigens, wie ich glaube, erst die Konstruktion der Tonleiter, auf die wir in der nächsten Abteilung eingehen werden. Die Tonleiter der modernen Musik kann die durch die Zahl 7 bestimmten Töne nicht in sich aufnehmen. In der musikalischen Harmonik kann es sich aber nur um Zusammenklänge zwischen Tönen der Tonleiter handeln. Intervalle, welche durch die Zahl 5 charakterisiert sind, nämlich die Terzen und Sexten, sind in der Tonleiter vorhanden, ferner kommen in ihr solche vor, welche durch die Zahl 9 charakterisiert sind, wie die große Sekunde 8:9, zwischen beiden fallen aber aus die durch die Zahl 7 charakterisierten Intervalle, welche den Übergang zwischen beiden bilden sollten. Hier bleibt also eine wirkliche Lücke in der Reihe der nach ihrem Wohlklang geordneten Zusammenklänge, und diese Lücke bestimmt dann auch die Grenze zwischen Konsonanzen und Dissonanzen.

Es sind also Gründe, die nicht in der Natur der Intervalle selbst, sondern die in der Konstruktion des ganzen Tonsystemes liegen, welche hier die Entscheidung geben. Dies bestätigt sich auch namentlich durch das historische Faktum, daß in der Tat die Grenze zwischen konsonanten und dissonanten Intervallen nicht immer dieselbe gewesen ist. Es ist schon oben erwähnt worden, daß die Griechen die Terzen durchaus immer als dissonant bezeichnet haben, und wenn auch früher die nach Quintenzyklen gestimmte pythagoreische Terz 64:81 keine Konsonanz war, so haben sie doch in späterer Zeit in ihrem sogenannten syntonisch diatonischen Geschlecht nach Didymus und Ptolemäus die natürliche große Terz 4:5 gehabt, ohne

sie als Konsonanz anzuerkennen. Es ist schon oben angeführt, wie man im Mittelalter erst die Terzen, später die Sexten als unvollkommene Konsonanzen anerkannte, wie man lange die Terzen aus den Schlußakkorden ganz fortließ, später die große und ganz zuletzt erst die kleine Terz zuließ. Es ist unrichtig, wenn neuere musikalische Theoretiker darin nur eine Bizarrerie und Unnatur zu sehen glauben oder meinen, die älteren Tonsetzer hätten sich durch blinden Glauben an die Autorität der Griechen fesseln lassen. Das letztere ist bei den Schriftstellern über musikalische Theorie bis zum 16. Jahrhundert hin allerdings einigermaßen der Fall gewesen. Aber zwischen den Tonsetzern und den musikalischen Theoretikern müssen wir einen Unterschied machen. Weder die Griechen, noch die großen Tonsetzer des 16. und 17. Jahrhunderts sind die Leute danach gewesen, um sich durch eine Theorie binden zu lassen, der ihre Ohren widersprochen hätten. Der Grund dieser Abweichungen liegt vielmehr in der Verschiedenheit der Tonartensysteme alter und neuer Zeit, die wir in der nächsten Abteilung näher kennen lernen werden. Es wird sich dort zeigen, daß unser modernes System wesentlich unter dem Einfluß der allgemein gewordenen Anwendung harmonischer Zusammenklänge die Gestalt gewonnen hat, in der wir es jetzt besitzen. In diesem System erst ist eine vollständige Berücksichtigung aller Anforderungen des Harmoniegewebes erreicht worden, und bei der festgeschlossenen Konsequenz dieses Systemes dürfen wir uns nicht nur manche Freiheiten im Gebrauch der unvollkommeneren Konsonanzen und der Dissonanzen erlauben, welche die älteren Systeme vermeiden mußten, sondern die Konsequenz des modernen Systemes fordert sogar oft, namentlich in den Schlußkadenzen, die Anwesenheit der Terzen zur sicheren Unterscheidung des Dur und Moll, wo sie früher umgangen wurde.

Da somit die Grenze zwischen Konsonanzen und Dissonanzen sich wirklich verändert hat mit der Veränderung der Tonsysteme, so ist dadurch auch bewiesen, daß der Grund, welcher bestimmt, wo diese Grenze zu ziehen sei, nicht in den Intervallen und ihrem Wohlklang selbst, sondern in der ganzen Konstruktion des Tonsystemes zu suchen sei.

Die Lösung des Rätsels, welches vor 2500 Jahren Pythagoras der nach den Gründen der Dinge forschenden Wissenschaft auf-

gegeben hat betreffs der Beziehung der Konsonanzen zu den Verhältnissen der kleinen ganzen Zahlen, hat sich nun darin ergeben, daß das Ohr die zusammengesetzten Klänge nach den Gesetzen des Mitschwingens in pendelartige Schwingungen auflöst, und daß es nur gleichmäßig andauernde Erregungen als Wohlklang auffaßt. Die Auflösung in Partialtöne geschieht aber, mathematisch ausgedrückt, nach dem von Fourier aufgestellten Gesetz, welches lehrt, wie eine jede beliebig beschaffene periodisch veränderliche Größe auszudrücken sei durch eine Summe einfachster periodischer Größen [1]). Die Länge der Perioden der einfach periodischen Glieder dieser Summe muß genau so groß sein, daß entweder eine, oder zwei, oder drei, oder vier usw. ihrer Perioden gleich sind der Periode der gegebenen Größe, was auf die Töne übertragen bedeutet, daß die Schwingungszahl der Obertöne bzw. genau zwei-, drei-, vier- usw. mal so groß sein muß, als die des Grundtones. Dies sind nun die ganzen Zahlen, welche das Verhältnis der Konsonanzen bestimmen. Denn, wie wir gesehen haben, besteht die Bedingung für die Konsonanz darin, daß zwei von den niederen Partialtönen der zusammenklingenden Noten gleich hoch sind; sonst gibt es störende Schwebungen. In letzter Instanz ist also der Grund der von Pythagoras aufgefundenen rationellen Verhältnisse in dem Satz von Fourier zu finden, und in gewissem Sinne ist dieser Satz als der Urquell des Generalbasses zu betrachten.

Das Verhältnis der ganzen Zahlen zu den Konsonanzen ist im Altertum, im Mittelalter und namentlich bei den orientalischen Völkern die Grundlage ausschweifender phantastischer Spekulationen gewesen. „Alles ist Zahl und Harmonie", war der charakteristische Hauptsatz der pythagoreischen Lehre. Dieselben Zahlenverhältnisse, welche zwischen den sieben Tönen der diatonischen Leiter bestanden, glaubte man in den Abständen der Weltkörper von dem Zentralfeuer wiederzufinden. Daher die Harmonie der Sphären, welche Pythagoras allein unter den Menschen, wie seine Schüler behaupteten, gehört haben sollte. Ziemlich ebensoweit in urälteste Zeit reichen die Zahlenspekulationen der Chinesen zurück. In dem Buche des Tso-kiu-ming, eines Freundes des Konfucius (500 v. Chr.), werden die fünf Töne der alten chinesischen Skala mit den fünf Elementen ihrer

[1]) Nämlich Sinus und Kosinus der variablen Größe.

Naturphilosophie (Wasser, Feuer, Holz, Metall und Erde) verglichen. Die ganzen Zahlen 1, 2, 3 und 4 werden als der Quell aller Vollkommenheit beschrieben. Später setzte man die 12 Halbtöne der Oktave in Beziehung zu den 12 Monaten des Jahres usw. Ähnliche Beziehungen der Töne zu den Elementen, den Temperamenten, den Sternbildern finden sich auch in bunter Menge bei den musikalischen Schriftstellern der Araber. Die Harmonie der Sphären spielt durch das ganze Mittelalter eine große Rolle; bei Athanasius Kircher musiziert nicht nur der Makrokosmus, sondern auch der Mikrokosmus, und selbst ein Mann von tiefstem wissenschaftlichen Geist, wie Keppler, konnte sich von dieser Art von Vorstellungen nicht ganz frei machen; ja noch in allerneuester Zeit gibt es theoretisierende Musikfreunde genug, die sich lieber an Zahlenmystik ergötzen, als daß sie die Obertöne zu hören versuchten.

In ernsterer und mehr wissenschaftlicher Art hat der berühmte Mathematiker L. Euler[1]) die Beziehungen der Konsonanzen zu den ganzen Zahlen auf psychologische Betrachtungen zu begründen gesucht, und die von ihm aufgestellte Ansicht kann wohl als diejenige betrachtet werden, welche während des verflossenen letzten Jahrhunderts den wissenschaftlichen Forschern am meisten zuzusagen, wenn auch vielleicht nicht zu genügen schien. Euler[2]) beginnt damit auseinander zu setzen, daß uns alles das gefalle, in welchem wir eine gewisse Vollkommenheit entdecken. Die Vollkommenheit eines Dinges sei aber dadurch bestimmt, daß alles an ihm auf die Erreichung seines Endzweckes hinarbeite. Daraus folgt, daß, wo Vollkommenheit sich finde, auch Ordnung sein müsse; denn Ordnung bestehe darin, daß alle Teile nach einer Regel angeordnet seien, aus welcher erkannt werden könne, warum jeder Teil lieber an den Platz, wo er sich befindet, als an irgend einen anderen gestellt worden sei. In einem mit Vollkommenheit ausgestatteten Gegenstand bestimme sich aber eine solche Regel der Anordnung durch den alle Teile beherrschenden Endzweck. Deshalb gefalle uns Ordnung mehr als Unordnung. Ordnung könnten wir aber auf zweierlei Weise wahrnehmen, entweder wenn wir das Gesetz schon kennen, aus welchem die Regel der An-

[1]) Tentamen novae theoriae Musicae, Petropoli, 1739.
[2]) l. c. Kap. II, § 7.

ordnung abgeleitet ist, indem wir die Folgerungen aus dem Gesetz mit der wahrgenommenen Anordnung vergleichen, oder zweitens, wenn wir das Gesetz der Anordnung vorher nicht kennen, indem wir es aus der vorhandenen Anordnung der Teile rückwärts zu erschließen suchen. Der letztere Fall ist derjenige, mit dem wir es in der Musik zu tun haben. Eine Zusammenstellung von Tönen werde uns gefallen, wenn wir das Gesetz ihrer Anordnung auffinden können. Dabei könne es wohl vorkommen, daß der eine Hörer es zu finden wisse, der andere nicht, und beide deshalb verschieden urteilten.

Je leichter wir nun die Ordnung wahrnehmen, welche in dem betreffenden Objekt wohnt, desto einfacher und vollkommener werden wir sie finden, und desto leichter und freudiger sie anerkennen. Eine Ordnung aber, deren Wahrnehmung uns Mühe macht, wird uns zwar auch gefallen, aber mit einem gewissen Gefühl der Mühe und Niedergeschlagenheit (*tristitia*).

In den Tönen seien es nun zwei Dinge, an denen Ordnung zum Vorschein kommen könne, nämlich die Tonhöhe und die Dauer. Die Ordnung der Tonhöhe zeige sich in den Intervallen, die der Dauer im Rhythmus. Zwar würde auch noch eine Ordnung der Tonstärke möglich sein, aber für diese fehle es uns an einem Maße. Wie nun im Rhythmus zwei oder drei oder vier gleiche Noten der einen Stimme auf eine, zwei oder drei Noten der anderen Stimme fallen können, wobei wir die Regelmäßigkeit einer solchen Anordnung leicht bemerken, besonders wenn sich dieselbe oft hintereinander wiederholt, und uns eine solche Ordnung gefällt, so gefiele es uns auch besser, wenn wir bemerkten, daß zwei, drei oder vier Schwingungen eines Tones auf eine, zwei oder drei eines anderen kämen, als wenn das Verhältnis der Schwingungszeiten irrational oder nur durch große Zahlen darstellbar sei. Daraus folgt denn, daß der Zusammenklang zweier Töne uns desto mehr gefalle, durch je kleinere ganze Zahlen ihr Schwingungsverhältnis ausgedrückt werden könne. Euler bemerkt auch, daß wir bei den höheren Tönen kompliziertere Schwingungsverhältnisse, also unvollkommenere Konsonanzen, leichter ertragen könnten, als bei den tieferen, weil sich bei jenen die Gruppen gleichgeordneter Schwingungen in gleicher Zeit häufiger wiederholten, als bei letzteren, und wir deshalb die Regelmäßigkeit auch einer verwickelteren Anordnung leichter erkennen könnten.

Euler entwickelt darauf eine arithmetische Regel, nach welcher die Stufe des Wohlklanges für ein Intervall oder einen Akkord aus den die Intervalle charakterisierenden Schwingungsverhältnissen berechnet werden kann. Der Einklang gehört in die erste Stufe, die Oktave in die zweite, Duodezime und Doppeloktave in die dritte, Quinte in die vierte, Quarte in die fünfte, große Dezime und Undezime in die sechste, große Sexte und große Terz in die siebente, kleine Sexte und kleine Terz in die achte, die natürliche Septime 4:7 in die neunte Stufe usw. In die letztere Stufe gehört auch der Durdreiklang in seiner engsten Lage, und als Quartsextenakkord. Der Sextenakkord des Durdreiklanges dagegen kommt in die folgende zehnte Stufe zu stehen. Der Molldreiklang mit seinem Sextenakkord steht ebenfalls in der neunten Stufe, sein Quartsextenakkord dagegen in der zehnten Stufe. In dieser Anordnung stimmen die Konsequenzen des Eulerschen Systemes mit unseren Resultaten ziemlich gut überein, nur in der Stellung der Durakkorde zu den Mollakkorden fehlt in seinem System der Einfluß der Kombinationstöne; es ist nur auf die Art der Intervalle Rücksicht genommen. Deshalb erscheinen die beiden Stammakkorde hier als gleich wohlklingend, obgleich andererseits der Sextenakkord der Durtonart und der Quartsextenakkord der Molltonart zurückstehen, wie bei uns [1]).

[1]) Ich will das Prinzip, nach welchem Euler die Stufenzahlen von Intervallen und Akkorden bestimmt, hierhersetzen, weil es in der Tat in seinen Konsequenzen, soweit nicht Kombinationstöne in Betracht kommen, sich gut bewährt. Wenn p eine Primzahl ist, so setzt er die Stufenzahl derselben $= p$. Alle anderen Zahlen sind Produkte von Primzahlen. Die Stufenzahl eines Produktes zweier Faktoren a und b, deren Stufenzahlen selbst bzw. α und β sind, ist $= \alpha + \beta - 1$. Handelt es sich darum, die Stufenzahl eines Akkordes zu finden, der in kleinsten Zahlen ausgedrückt gleich $p:q:r:s$ usw. gesetzt werden kann, so sucht Euler die kleinste Zahl, welche sowohl p, als q, als r, als s usw. als Faktor enthält; deren Stufenzahl ist auch die Stufenzahl des Akkordes. Also z. B. die Stufenzahl

von 2 ist 2
von 3 ist 3
von $4 = 2.2$ ist $2 + 2 - 1 = 3$
von $12 = 4.3$ ist $3 + 3 - 1 = 5$
von $60 = 12.5 = 5 + 5 - 1 = 9$

Die vom Durakkord 4:5:6 ist gleich der von 60, weil 60 durch 4, durch 5 und durch 6 ohne Rest dividiert werden kann.

Euler hat diese Untersuchungen nicht nur auf einzelne Konsonanzen und Akkorde, sondern auch auf Folgen von solchen, auf die Konstruktion der Tonleitern, die Modulationen angewendet, und es kommen viele überraschende Spezialitäten vollkommen richtig heraus. Aber abgesehen davon, daß das Eulersche System die Erklärung der Tatsache schuldig bleibt, warum eine schwach verstimmte Konsonanz nahezu ebensogut klingt, wie eine reine, und besser als eine stärker verstimmte, während doch die Zahlenverhältnisse gerade für eine schwach verstimmte Konsonanz in der Regel am meisten kompliziert sein werden, so liegt die Hauptschwierigkeit der Eulerschen Ansicht darin, daß gar nicht gesagt wird, wie es die Seele denn mache, daß sie die Zahlenverhältnisse je zwei zusammenklingender Töne wahrnehme. Wir müssen bedenken, daß der natürliche Mensch sich kaum klar macht, daß der Ton auf Schwingungen beruhe. Dafür ferner, daß die Schwingungszahlen verschieden sind, bei hohen Tönen größer als bei kleinen, und daß sie bei bestimmten Intervallen bestimmte Verhältnisse haben, fehlt der unmittelbaren bewußten sinnlichen Wahrnehmung jedes Hilfsmittel der Erkenntnis. Es kommen zwar mancherlei sinnliche Wahrnehmungen vor, wobei wir selbst nicht anzugeben wissen, wie wir es machen, zu der betreffenden Erkenntnis zu gelangen, wenn wir z. B. aus der Resonanz eines Raumes auf seine Größe und Gestalt, aus den Gesichtszügen eines Menschen auf seinen Charakter schließen. Aber in diesen Fällen haben wir eine lange Reihe von Erfahrungen über, die betreffenden Verhältnisse gemacht, aus denen wir durch Analogieschlüsse uns ein Urteil ziehen, ohne daß wir die einzelnen Tatsachen uns deutlich zu vergegenwärtigen wissen, auf denen das Urteil beruht. Mit den Schwingungszahlen ist es aber ganz anders. Wer nicht physikalische Versuche anstellt, hat nie in seinem Leben Gelegenheit, etwas über die Schwingungszahlen oder über ihre Verhältnisse zu erfahren. Und in diesem Falle bleibt doch die Mehrzahl der Menschen, welche sich über Musik freuen, ihr Leben lang.

Also bliebe es jedenfalls noch übrig, die Mittel nachzuweisen, durch welche in der Sinnesempfindung die Verhältnisse der Schwingungszahlen wahrnehmbar gemacht werden. Diese Mittel habe ich mich bemüht nachzuweisen, und in gewissem Sinn ergänzen also die

Resultate der vorliegenden Untersuchung, was an der von Euler noch mangelte. Aber es folgt aus den physiologischen Vorgängen, welche den Unterschied zwischen Konsonanz und Dissonanz, oder nach Euler der geordneten und ungeordneten Tonverhältnisse, fühlbar machen, doch auch schließlich ein wesentlicher Unterschied unserer Erklärungsweise von der Eulerschen. Nach der letzteren soll die Seele die rationalen Verhältnisse der Tonschwingungen als solche wahrnehmen, nach unserer nimmt sie nur eine physikalische Wirkung jener Verhältnisse wahr, die intermittierende oder kontinuierliche Empfindung des Gehörnerven. Der Physiker weiß allerdings, daß die Empfindung einer Konsonanz kontinuierlich ist, weil die Verhältnisse der Schwingungszahlen rationell sind, aber in das Bewußtsein des der Physik unkundigen Hörers eines Musikstückes tritt nichts davon ein, und auch dem Physiker wird durch seine bessere Einsicht von der Sache ein Akkord nicht wohlklingender. Ganz anders ist es mit der Ordnung des Rhythmus. Daß auf eine ganze Note genau zwei halbe, oder drei Triolen, oder vier Viertel kommen, bemerkt jeder, der aufmerksam zuhört, auch ohne weiteren Unterricht. Das geordnete Verhältnis der Schwingungen zweier zusammenklingender Töne dagegen übt zwar auf das Ohr eine besondere Wirkung aus, durch die es sich von allen ungeordneten (irrationalen) Verhältnissen unterscheidet, aber dieser Unterschied der Konsonanz und Dissonanz beruht auf physikalischen Vorgängen, nicht auf psychologischen.

Näher schon unserer Theorie kommen die Betrachtungen, welche Rameau und d'Alembert[1]) einerseits und Tartini[2]) andererseits über den Grund der Konsonanz angestellt haben. Letzterer gründete seine Theorie auf die Existenz der Kombinationstöne, die erstgenannten auf die der Obertöne. Man sieht, sie hatten die richtigen Angriffspunkte aufgespürt, aber die akustischen Kenntnisse des vorigen Jahrhunderts reichten noch nicht hin, genügende Konsequenzen daraus zu ziehen. Tartinis Buch soll nach d'Alemberts Aussage so dunkel und unklar geschrieben sein, daß er, wie auch andere gut unter-

[1]) Eléments de Musique suivant les principes de M. Rameau par M. d'Alembert. Lyon 1762.

[2]) Traité de l'Harmonie 1754.

richtete Leute, es unmöglich fand, sich darüber ein Urteil zu bilden. Das Buch von d'Alembert dagegen ist ausgezeichnet klar und musterhaft in der Darstellung, wie man es nur von einem so feinen und exakten Kopf erwarten darf, der zugleich zu den größten Physikern und Mathematikern seines Zeitalters zu rechnen ist. Rameau und d'Alembert gehen von zwei Tatsachen aus, die sie als die Grundlagen ihres Systemes betrachten. Die erste ist, daß man bei jedem tönenden Körper mit dem Grundton (*générateur*) auch die Duodezime und nächst höhere Terz als Obertöne (*harmoniques*) höre. Die zweite ist, daß jedermann die Ähnlichkeit bemerke, die zwischen einem jeden Ton und seiner Oktave stattfinde. Durch die erste Tatsache sei gezeigt, daß der Durakkord von allen Akkorden der natürlichste sei, und durch die zweite, daß man die Quinte und Terz auch um bzw. eine und zwei Oktaven herabrücken dürfe, ohne das Wesen des Akkordes zu verändern, so daß man dadurch den Durdreiklang in seinen verschiedenen Umlagerungen erhält. Der Mollakkord entsteht dann, indem man drei Töne sucht, welche alle drei denselben Oberton, nämlich die Quinte des Akkordes, haben (*C*, *Es* und *G* lassen wirklich alle ein *g'* mitklingen). Der Mollakkord sei deshalb zwar nicht ganz so vollkommen und natürlich, wie der Durakkord, aber doch auch durch die Natur vorgeschrieben.

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts, wo man unter den Übeln eines verkünstelten gesellschaftlichen Zustandes schwer zu leiden anfing, mochte es genügen, eine Sache als natürlich darzustellen, um dadurch auch zu beweisen, daß sie schön und wünschenswert sei, und auch gegenwärtig werden wir nicht leugnen wollen, daß bei der großen Vollendung und Zweckmäßigkeit sämtlicher organischer Einrichtungen des menschlichen Körpers der Nachweis solcher in der Natur gegebenen Verhältnisse, wie sie Rameau zwischen den Tönen des Durakkordes aufgefunden hatte, alle Beachtung verdient, wenigstens als Anhaltspunkt für die weitere Forschung. Und in der Tat hatte auch Rameau, wie wir jetzt übersehen können, vollkommen richtig vermutet, daß von dieser Tatsache aus die Lehre der Harmonie zu begründen sei. Aber abgemacht war es damit freilich nicht. Denn in der Natur kommt Schönes und Häßliches, Heilsames und Schädliches vor. Der bloße Nachweis, daß etwas natürlich sei, genügt also

noch nicht, es ästhetisch zu rechtfertigen. Außerdem hätte Rameau bei geschlagenen Stäben, Glocken, Membranen, angeblasenen Hohlräumen noch mancherlei entschieden dissonante Akkorde hören können. Solche Akkorde würde man doch auch für natürlich erklären müssen. Daß die Musikinstrumente alle harmonische Obertöne zeigen, beruht auf der Wahl, die der Mensch zwischen den Klangfarben nach den Bedürfnissen seines Ohres getroffen hat.

Zweitens ist auch die Ähnlichkeit der Oktave mit ihrem Grundton, auf welche Rameau sich stützt, ein musikalisches Phänomen, welches ebensogut der Erklärung bedarf, wie das Phänomen der Konsonanz.

Niemand hat übrigens besser als d'Alembert selbst die Lücken dieses Systemes eingesehen. Er verwahrt sich deshalb in dem Vorwort seines Buches sehr entschieden gegen den Ausdruck „Demonstration des Prinzipes der Harmonie", welchen Rameau gebraucht hatte. Er erklärt, daß er für sein Teil nichts geben wolle, als eine wohl zusammenhängende und konsequente Darstellung sämtlicher Gesetze der Harmonielehre, sie anknüpfend an die eine Grundtatsache, nämlich die Existenz der Obertöne, welche er als gegeben nimmt, ohne weiter zu fragen, wo sie herkommt. So beschränkt er sich denn auch auf den Nachweis der „Natürlichkeit" des Dur- und Molldreiklanges. Von den Schwebungen ist in dem Buche keine Rede, daher auch nicht von dem eigentlichen Unterschied zwischen Konsonanz und Dissonanz. Von den Gesetzen der Schwebungen wußte man zu jener Zeit erst außerordentlich wenig, die Kombinationstöne waren eben erst durch Romieu (1753) und Tartini (1754) den französischen Gelehrten bekannt geworden. In Deutschland waren sie einige Jahre früher durch Sorge (1745) entdeckt, diese Nachricht aber wohl wenig verbreitet. Es fehlte also das Material von Tatsachen, mit welchem allein eine vollständigere Theorie aufgebaut werden konnte.

Dennoch ist dieser Versuch von Rameau und d'Alembert von großer historischer Wichtigkeit, insofern dadurch die Theorie der Konsonanz zum ersten Male von metaphysischem auf naturwissenschaftlichen Boden gerückt wurde. Es ist bewundernswert, was beide mit dem spärlichen Material, das ihnen zu Gebote stand, geleistet

haben, und was für ein klares, präzises und übersichtliches System die vorher so wüste und schwerfällige Theorie der Musik unter ihren Händen geworden ist. Wie wichtige Fortschritte Rameau in dem eigentlich musikalischen Teil der Harmonielehre gemacht hat, werden wir später noch auseinander zu setzen haben.

Wenn ich selbst also etwas Vollständigeres zu geben imstande war, so habe ich das nur dem Umstand zu verdanken, daß mir die große Menge physikalischer Vorarbeiten zum Gebrauch bereit war, welche das inzwischen verflossene Jahrhundert aufgehäuft hat.

DRITTE ABTEILUNG

DIE VERWANDTSCHAFT DER KLÄNGE

TONLEITERN UND TONALITÄT

Dreizehnter Abschnitt.

Übersicht der verschiedenen Prinzipien des musikalischen Stiles in der Entwickelung der Musik.

Bis hierher ist unsere Untersuchung rein naturwissenschaftlicher Art gewesen. Wir haben die Gehörempfindungen analysiert, wir haben die physikalischen und physiologischen Gründe der gefundenen Erscheinungen, die Obertöne, Kombinationstöne, Schwebungen aufgesucht. In diesem ganzen Gebiete hatten wir es nur mit Naturerscheinungen zu tun, die rein mechanisch und ohne Willkür bei allen lebenden Wesen ebenso eintreten müssen, deren Ohr nach einem ähnlichen anatomischen Plane konstruiert ist, wie das unsere. In einem solchen Gebiete, wo mechanische Notwendigkeit herrscht und alle Willkür ausgeschlossen ist, kann man auch von der Wissenschaft verlangen, daß sie feste Gesetze der Erscheinungen aufstelle und einen strengen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung streng nachweise. Wie in den Erscheinungen, welche die Theorie umfaßt, nichts Willkürliches ist, so darf auch in den Gesetzen, unter welche diese Erscheinungen gefaßt werden, in den Erklärungen, die wir ihnen unterlegen, schließlich nichts Willkürliches bleiben. Und solange so etwas noch darin wäre, hätte die Wissenschaft die Aufgabe (wie meistens auch die Mittel), durch fortgesetzte Untersuchungen es auszuschließen.

Indem wir uns in dieser dritten Abteilung unserer Untersuchungen hauptsächlich der Musik zuwenden, und zur Begründung der elementaren Regeln der musikalischen Komposition übergehen wollen, betreten wir einen anderen Boden, der nicht mehr rein naturwissenschaftlich ist, wenn auch die von uns gewonnene Einsicht in das Wesen des Hörens hier noch mannigfache Anwendung finden wird. Wir schreiten hier zu einer Aufgabe, die ihrem Wesen nach in das Gebiet der Ästhetik gehört. Wenn wir bisher in der Lehre von den

Konsonanzen von Angenehm und Unangenehm gesprochen haben, so handelte es sich nur um den unmittelbaren sinnlichen Eindruck des isolierten Zusammenklanges auf das Ohr, ohne alle Rücksicht auf künstlerische Gegensätze und Ausdrucksmittel, also nur um sinnliches Wohlgefallen, nicht um ästhetische Schönheit. Beide sind streng zu trennen, wenn auch das erstere ein wichtiges Mittel ist, um die Zwecke der letzteren zu erreichen.

Die geänderte Natur der fortan zu behandelnden Gegenstände verrät sich schon durch ein ganz äußerliches Kennzeichen, nämlich dadurch, daß wir fast bei jedem einzelnen derselben auf historische und nationale Geschmacksverschiedenheiten stoßen. Ob ein Zusammenklang mehr oder weniger rauh ist als ein anderer, hängt nur von der anatomischen Struktur des Ohres, nicht von psychologischen Motiven ab. Wieviel Rauhigkeit aber der Hörer als Mittel musikalischen Ausdruckes zu ertragen geneigt ist, hängt von Geschmack und Gewöhnung ab; daher die Grenze zwischen Konsonanzen und Dissonanzen sich vielfältig geändert hat. Ebenso sind die Tonleitern, Tonarten und deren Modulationen mannigfachem Wechsel unterworfen gewesen, nicht bloß bei ungebildeten und rohen Völkern, sondern selbst in denjenigen Perioden der Weltgeschichte und bei denjenigen Nationen, wo die höchsten Blüten menschlicher Bildung zum Aufbruch kamen.

Daraus folgt der Satz, der unseren musikalischen Theoretikern und Historikern noch immer nicht genügend gegenwärtig ist, daß das System der Tonleitern, der Tonarten und deren Harmoniegewebe nicht bloß auf unveränderlichen Naturgesetzen beruht, sondern daß es zum Teil auch die Konsequenz ästhetischer Prinzipien ist, die mit fortschreitender Entwickelung der Menschheit einem Wechsel unterworfen gewesen sind und ferner noch sein werden.

Daraus folgt nun noch nicht, daß die Wahl der genannten Elemente musikalischer Technik rein willkürlich sei, und sie keine Ableitung aus einem allgemeineren Gesetz zuließen. Im Gegenteil, die Regeln eines jeden Kunststiles bilden ein wohl zusammenhängendes System, wenn derselbe überhaupt zu einer reichen und vollendeten Entwickelung gekommen ist. Ein solches System von Kunstregeln wird zwar von den Künstlern nicht aus bewußter Absicht und Konsequenz

entwickelt, sondern mehr durch herumtastende Versuche und durch das Spiel der Phantasie, indem sie ihre Kunstgebilde bald so, bald anders sich ausdenken oder ausführen, und durch den Versuch allmählich ermitteln, welche Art und Weise ihnen am besten gefalle. Aber die Wissenschaft kann die Motive doch zu ermitteln suchen, seien sie nun psychologischer oder technischer Art, die bei diesem Verfahren der Künstler wirksam gewesen sind. Der wissenschaftlichen Ästhetik werden hierbei die psychologischen Motive zur Untersuchung zufallen, der Naturwissenschaft die technischen. Wenn der Zweck richtig festgestellt ist, dem die Künstler einer gewissen Stilart nachstreben, und die Hauptrichtung des Weges, den sie dazu eingeschlagen haben, so läßt sich übrigens mehr oder weniger bestimmt nachweisen, warum sie gezwungen waren, diese oder jene Regel zu befolgen, dieses oder jenes technische Mittel zu ergreifen. In der Musiklehre namentlich, wo eigentümliche physiologische Tätigkeiten des Ohres, die nicht unmittelbar vor der bewußten Selbstbeobachtung offen daliegen, eine große Rolle spielen, bleibt der wissenschaftlichen Erörterung ein breites und reiches Feld offen, um die Notwendigkeit der technischen Regeln für eine jede einzelne Richtung in der Entwickelung unserer Kunst zu erweisen.

Die Charakterisierung freilich der Hauptaufgabe, welche jede Kunstschule verfolgt, und des Grundprinzips ihres Kunststiles kann nicht Aufgabe der Naturwissenschaft sein, sondern diese muß ihr aus den Resultaten der historischen und ästhetischen Forschungen gegeben werden.

Der Vergleich mit der Baukunst, welche ebenso wie die Musik wesentlich voneinander verschiedene Richtungen eingeschlagen hat, wird das Verhältnis deutlicher zu machen geeignet sein. Die Griechen ahmten in ihren steinernen Tempeln die ursprünglichen Holzbauten nach; das war das Grundprinzip ihres Baustiles. Man erkennt noch deutlich in der ganzen Gliederung und in der Anordnung der Verzierungen diese Nachahmung der Holzkonstruktion. Die senkrechte Stellung der tragenden Säulen, die meist horizontale des getragenen Gebälkes zwangen, auch alle untergeordneten Teile überwiegend nach horizontalen und vertikalen Linien zu gliedern. Für die Zwecke des griechischen Gottesdienstes, dessen Hauptakte unter freiem Himmel geschahen, genügten solche Bauten, deren innere Räumlichkeit natürlich durch die Länge der verwendbaren steinernen oder hölzernen

Balken eng begrenzt war. Die alten Italiener (Etrusker) dagegen erfanden das Prinzip des aus keilförmigen Steinen zusammengesetzten Gewölbes. Durch diese technische Erfindung wurde es möglich, viel weitläuftigere Gebäude mit gewölbten Decken zu überdachen, als die Griechen es mit ihren horizontalen Balken tun konnten. Unter diesen gewölbten Gebäuden sind bekanntlich die Gerichtshallen (Basiliken) für die spätere Entwickelung der Baukunst bedeutend geworden. Mit der gewölbten Decke tritt nun der Rundbogen in der romanischen (byzantinischen) Kunst als Hauptmotiv der Gliederung und Verzierung auf. Die Säulen verwandelten sich der schwereren Last entsprechend in Pfeiler, denen sich nach voller Entwickelung dieses Stiles Säulen nur noch in sehr verjüngten Dimensionen und halb in die Masse des Pfeilers eingesenkt, als eine verzierende Gliederung desselben, und als untere Fortsetzung der Gewölberippen, die vom oberen Ende des Pfeilers nach der Decke ausstrahlten, anschlossen.

In dem Gewölbe drängen die keilförmig gehauenen Steine gegeneinander; weil sie aber alle gleichmäßig nach innen drängen, verhindert jeder den anderen, wirklich zu fallen. Den stärksten und gefährlichsten Druck üben die Steine in dem horizontalen Teile des Gewölbes, die gar keine, auch keine schief gestellte Unterlage mehr haben, sondern nur noch durch ihre Keilform und die größere Dicke ihres oberen Endes am Fallen gehindert werden. Bei sehr großen Gewölben ist also der horizontal liegende mittlere Teil der gefährlichste, der bei der kleinsten Nachgiebigkeit der Nachbarsteine zusammenstürzt. Als nun die mittelalterlichen Kirchenbauten immer größere Dimensionen annahmen, verfiel man darauf, den mittleren horizontal liegenden Teil des Gewölbes ganz wegzulassen, und die Seiten unter mäßigerer Steigung aufwärts laufen zu lassen, bis sie oben im Spitzbogen zusammenstießen. Nun wurde dementsprechend der Spitzbogen das herrschende Prinzip. Das Gebäude gliederte sich äußerlich durch die hervortretenden Strebepfeiler. Diese, wie der überall hindurchbrechende Spitzbogen, gaben harte Formen, die Kirchen wurden im Inneren enorm hoch. Beides aber entsprach dem kräftigen Sinne der nordischen Völker, und vielleicht erhöhte sogar die Härte der Formen den Eindruck des Gewaltigen und Mächtigen, weil sie vollständig beherrscht sind von der wunderbaren Konsequenz, die sich durch die bunte Formenpracht der gotischen Dome hinzieht.

So sehen wir hier, wie die an die wachsenden Aufgaben sich anschließenden technischen Erfindungen nacheinander drei ganz verschiedene Stilprinzipien, nämlich das der geraden Horizontallinie, des Rundbogens und des Spitzbogens, erzeugten, und wie mit jeder neuen Änderung in dem Hauptplan der Konstruktion des Gebäudes auch alle untergeordneten Einzelheiten bis in die kleinsten Verzierungen hinein sich ändern; daher sind auch die einzelnen technischen Konstruktionsregeln nur aus dem Konstruktionsprinzip des Ganzen zu begreifen. Obgleich der gotische Stil die reichsten und in sich konsequentesten, die mächtigsten und ergreifendsten Architekturformen entwickelt hat, ungefähr wie unser modernes Musiksystem unter den übrigen, so wird es doch nicht leicht jemandem einfallen, behaupten zu wollen, der Spitzbogen sei die natürlich gegebene Urform aller architektonischen Schönheit, und müsse überall eingeführt werden. Und gegenwärtig weiß man sehr wohl, daß es eine künstlerische Absurdität ist, einem Gebäude in griechischer Tempelform gotische Fenster einzusetzen, sowie sich auch umgekehrt leider jedermann in unseren meisten gotischen Domen davon überzeugen kann, wie abscheulich die vielen kleinen, in griechischem oder römischem Stil ausgeführten Kapellen aus der Renaissancezeit zum Ganzen passen. Ebensowenig wie den gotischen Spitzbogen müssen wir unsere Durtonleiter als Naturprodukt betrachten, wenigstens nicht in anderem Sinne, als daß beide die notwendige und durch die Natur der Sache bedingte Folge des gewählten Stilprinzips sind. Und ebensowenig wie wir in einem griechischen Tempel gotische Verzierungen setzen, müssen wir die in Kirchentonarten geschriebenen Kompositionen dadurch verbessern wollen, daß wir ihre Töne nach dem Schema unserer Dur- und Mollharmonie mit Versetzungszeichen versehen. Bisher hat freilich dieser Sinn für historische Kunstauffassung bei unseren Musikern und selbst bei den musikalischen Historikern noch wenig Fortschritte gemacht. Sie beurteilen alte Musik meist nach den Vorschriften der modernen Harmonielehre und sind geneigt, jede Abweichung von der letzteren für bloßes Ungeschick der Alten zu halten, oder für barbarische Geschmacklosigkeit [1]).

[1]) Namentlich in den an fleißig gesammelten Tatsachen sonst so reichen historisch musikalischen Schriften von R. G. Kiesewetter herrscht ein offenbar übertriebener Eifer, alles zu leugnen, was nicht in das Schema der Dur- und Molltonart paßt.

Ehe wir also an die Konstruktion der Tonleitern und der Regeln für das Harmoniegewebe gehen können, müssen wir die Stilprinzipien wenigstens der Hauptentwickelungsphasen der musikalischen Kunst zu bezeichnen suchen. Wir können sie für unsere Zwecke nach drei Hauptperioden unterscheiden:

1. Die homophone (einstimmige) Musik des Altertumes, an welche sich auch die jetzt bestehende Musik der orientalischen und asiatischen Völker anschließt.

2. Die polyphone Musik des Mittelalters, vielstimmig, aber noch ohne Rücksicht auf die selbständige musikalische Bedeutung der Zusammenklänge, vom 10. bis in das 17. Jahrhundert reichend, wo sie dann übergeht in

3. die harmonische oder moderne Musik, charakterisiert durch die selbständige Bedeutung, welche die Harmonie als solche gewinnt. Ihre Ursprünge fallen in das 16. Jahrhundert.

1. Die homophone Musik.

Die einstimmige Musik ist bei allen Völkern die ursprüngliche gewesen. Wir finden sie noch bei den Chinesen, Indern, Arabern, Türken und Neugriechen in diesem Zustande, trotzdem diese Völker zum Teil sehr ausgebildete Musiksysteme besitzen. Daß die Musik der hellenischen Blütezeit, abgesehen vielleicht von einzelnen Instrumentalverzierungen, Kadenzen und Zwischenspielen, durchaus einstimmig gewesen ist, oder die Stimmen miteinander höchstens in der Oktave gingen, kann jetzt wohl als festgestellt gelten. In den Problemen des Aristoteles[1]) wird gefragt: „Weshalb wird die Konsonanz der Oktave allein gesungen? Diese spielen sie auf der Magadis (einem harfenähnlichen Instrument), aber keine von den anderen

[1]) Probl. XIX, 18 und 39. Gegen das Ende der Gesänge scheint zuweilen die Instrumentalbegleitung sich von der Stimme getrennt zu haben. Man scheint dies unter dem Namen der Krusis (κρούσις ὑπὸ τὴν ᾠδήν) verstehen zu müssen. Siehe Arist. Probl. XIX, 39 und Plutarch de Musica XIX, XXVIII. Daß sie übrigens die Wirkung der Konsonanzen kannten, aber nicht liebten, zeigt die Stelle Aristoteles de Audibilibus. Ed. Bekker, S. 801: „Deshalb verstehen wir auch besser, wenn wir nur einen hören, als wenn viele dasselbe sagen. Ebenso auf den Saiten. Und noch viel schlimmer ist es, wenn gleichzeitig die Kithara gespielt und dazu die Flöte geblasen wird, weil die Stimmen dann mit den anderen zusammenfließen. Besonders ist dies bei den Konsonanzen deutlich. Beide Töne verbergen sich nämlich untereinander."

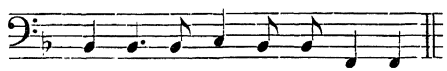
Konsonanzen." An einer anderen Stelle bemerkt er, daß die Stimmen von Knaben und Männern, die in Wechselgesängen zusammenwirken, das Intervall einer Oktave zwischen sich lassen.

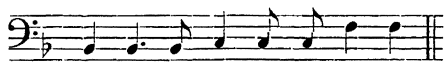
Einstimmige Musik, allein und für sich genommen ohne Begleitung der Poesie, ist zu arm an Formen und Veränderungen, als daß sich darin größere und reichere Kunstformen entwickeln könnten. Daher ist die reine Instrumentalmusik in diesem Stadium notwendig beschränkt auf kurze Tanzstückchen oder Märsche; mehr findet sich in der Tat nicht vor bei den Völkern, welche keine harmonische Musik haben. Zwar haben Flötenvirtuosen[1]) in den pythischen Spielen wiederholt den Sieg davongetragen, aber Virtuosenkünste lassen sich auch in knappen Kompositionsformen, z. B. in Variationen einer kurzen Melodie, ausführen. Daß übrigens das Prinzip der Variationen (*μεταβολή*) einer Melodie mit Berücksichtigung des dramatischen Ausdruckes (*μίμησις*) den Griechen bekannt war, geht ebenfalls aus Aristoteles (Problem 15) hervor. Er beschreibt die Sache sehr deutlich und bemerkt, daß man die Chöre müsse die Melodien in den Antistrophen einfach wiederholen lassen, weil viele Variationen anzubringen einem leichter sei als vielen. Die Wettkämpfer aber und die Schauspieler könnten dergleichen ausführen.

Umfangreichere Kunstwerke kann homophone Musik nur als Gesang in Verbindung mit der Poesie bilden, und in dieser Weise ist die Musik auch im klassischen Altertum angewendet worden. Nicht nur Lieder (Oden) und religiöse Hymnen wurden gesungen, sondern selbst Tragödien und große epische Gesänge wurden in einer gewissen Weise musikalisch vorgetragen und mit der Lyra begleitet. Wir können uns jetzt schwer eine Vorstellung davon machen, wie das geschah, da wir nach unserer modernen Geschmacksrichtung gerade im Gegenteil von einem guten Deklamator oder Vorleser dramatische Naturwahrheit im Sprechton verlangen, und singenden Ton als einen der größten Fehler betrachten. In dem singenden Ton der italienischen Deklamatoren, in den liturgischen Rezitationen der römisch-katholischen Priester mögen wir Nachklänge des antiken Sprechgesanges haben. Übrigens lehrt eine etwas aufmerksamere Beobachtung bald, daß auch im gewöhnlichen Sprechen, wo der singende Ton der Stimme hinter

[1]) Vielleicht waren die *αὐλοί* unseren Oboen ähnlicher.

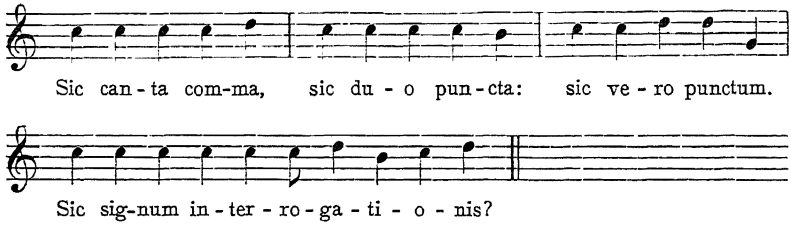
den Geräuschen, welche die einzelnen Buchstaben charakterisieren, mehr versteckt wird, wo ferner die Tonhöhe nicht genau festgehalten wird und schleifende Übergänge in der Tonhöhe häufig eintreten, sich dennoch gewisse, nach regelmäßigen musikalischen Intervallen gebildete Tonfälle unwillkürlich einfinden. Wenn einfache Sätze gesprochen werden ohne Affekt des Gefühls, so wird meist eine gewisse mittlere Tonhöhe festgehalten, und nur die betonten Worte und die Enden der Sätze und Satzabschnitte werden durch einen Wechsel der Tonhöhe hervorgehoben. Das Ende eines bejahenden Satzes vor einem Punkt pflegt dadurch bezeichnet zu werden, daß man von der mittleren Tonhöhe um eine Quarte fällt. Der fragende Schluß steigt empor, oft um eine Quinte über den Mittelton. Z. B. eine Baßstimme spricht:





Akzentuierte Worte werden ebenfalls dadurch hervorgehoben, daß man sie etwa einen Ton höher legt als die übrigen usf. Beim feierlichen Deklamieren werden die Tonfälle mannigfacher und komplizierter. Das moderne Rezitativ ist durch Nachahmung dieser Tonfälle in gesungenen Noten entstanden. Darüber spricht sich sein Erfinder Jacob Peri in der Vorrede zu seiner 1600 herausgegebenen Oper Eurydice ganz deutlich aus. Man suchte damals durch das Rezitativ die Deklamation der antiken Tragödien wieder herzustellen. Nun ist allerdings die antike Rezitation von unserem modernen Rezitativ dadurch einigermaßen verschieden gewesen, daß jene das Metrum der Gedichte genauer festhielt und ihr die begleitenden Harmonien des letzteren fehlten. Indessen können wir doch aus unserem Rezitativ, wenn es gut vorgetragen wird, einen besseren Begriff davon erhalten, wie sehr durch eine solche musikalische Rezitation der Ausdruck der Worte gesteigert werden kann, als durch die monotone Rezitation der römischen Liturgie, obgleich die letztere der Art nach vielleicht der antiken Rezitation ähnlicher ist, als das Opernrezitativ. Die Feststellung der römischen Liturgie durch Papst Gregor den

Großen (590 bis 604) reicht zurück in eine Zeit, wo Reminiszenzen der alten Kunst, wenn auch verblaßt und entstellt, durch Tradition noch überliefert sein konnten, namentlich wenn, wie man wohl als wahrscheinlich annehmen darf, Gregorius im wesentlichen nur die Normen für die schon seit der Zeit des Papstes Sylvester (314 bis 335) bestehenden römischen Singschulen endgültig festgestellt hat. Die meisten dieser Formeln für die Lektionen, Kollekten usw. ahmen deutlich den Tonfall des gewöhnlichen Sprechens nach. Sie gehen in gleicher Tonhöhe fort, einzelne akzentuierte oder nicht lateinische Worte werden in der Tonhöhe etwas verändert, für jede Interpunktion sind besondere Schlußformeln vorgeschrieben, z. B. für die Lektionen nach Münsterschem Gebrauch[1]):



Nach der Feierlichkeit des Festes, dem vorgetragenen Gegenstande, dem Range des vortragenden oder darauf antwortenden Priesters sind diese und ähnliche Schlußformeln bald mehr, bald weniger verziert. Man erkennt leicht in ihnen das Streben, die natürlichen Tonfälle der gewöhnlichen Sprache nachzuahmen, aber so, daß sie, von ihren individuellen Unregelmäßigkeiten befreit, feierlicher klingen. Freilich wird in solchen feststehenden Formeln auf den grammatischen Sinn der Sätze nicht geachtet, der denn doch die Betonung sehr mannigfaltig abändert. In ähnlicher Weise kann man sich denken, daß die antiken Tragödiendichter ihren Schauspielern die Tonfälle

[1]) Antony, Lehrbuch des Gregorianischen Kirchengesanges. Münster 1829. Nach den von Fétis in seiner Histoire générale de Musique, Paris 1869, Tl. I, Kap. VI zusammengestellten Nachrichten ist es übrigens zweifelhaft geworden, ob dieses System der Deklamation mit vorgeschriebenen Kadenzen nicht vielmehr aus dem jüdischen Ritualgesang herzuleiten ist. Schon in den ältesten Handschriften des Alten Testamentes finden sich 25 verschiedene Zeichen für solche Kadenzen und melodische Phrasen angewendet. Ja der Umstand, daß die entsprechenden Zeichen der griechischen Kirche ägyptische Schriftzeichen des Demotischen Alphabetes sind, deutet auf einen viel älteren ägyptischen Ursprung dieser Notation hin.

vorschrieben, in denen gesprochen werden sollte, und sie durch musikalische Begleitung darin erhielten. Und da sich die antike Tragödie von unmittelbarer äußerlicher Naturwahrheit viel mehr entfernt hielt als das moderne Schauspiel, wie die künstlichen Rhythmen, die ungewöhnlichen volltönenden Worte, die steifen fremdartigen Masken zeigen, so konnte auch ein mehr singender Ton zur Deklamation passen, als er unserem modern gewöhnten Ohr vielleicht gefallen würde. Dann müssen wir bedenken, daß durch Akzentuierung (Vermehrung der Tonstärke) einzelner Worte, durch die Schnelligkeit oder Langsamkeit des Sprechens, durch Pantomimik sich noch viel Leben in eine solche Vortragsweise bringen läßt, die freilich unerträglich monoton wird, wenn der Vortragende sie nicht auf solche Weise zu beleben weiß.

Jedenfalls aber hat die homophone Musik, auch wo sie in alter Zeit ausgedehnte Dichtungen größter Art zu begleiten hatte, immer notwendig eine ganz unselbständige Rolle gespielt. Die musikalischen Wendungen mußten eben durchaus von dem wechselnden Sinn der Worte abhängen, und konnten ohne diesen keinen selbständigen Kunstwert und Zusammenhang haben. Eine eigentliche durchgehende Melodie zum Absingen von Hexametern in den Epen oder von jambischen Trimetern in den Tragödien wäre unerträglich gewesen. Freier dagegen und selbständiger sind wohl diejenigen Melodien (Nomen) gewesen, welche man den Oden und tragischen Chören unterlegte. Für die Oden gab es auch bekannte Melodien, deren Benennungen zum Teil noch aufbewahrt sind, auf welche man immer wieder neue Gedichte machte.

In den großen ausgeführten Kunstwerken also mußte die Musik ganz unselbständig sein, selbständig konnte sie nur kurze Sätze bilden. Damit hängt nun ganz wesentlich die Ausbildung des musikalischen Systemes der homophonen Musik zusammen. Wir finden allgemein bei den Nationen, welche dergleichen Musik besitzen, gewisse Stufenleitern der Tonhöhe festgesetzt, in denen sich die Melodien bewegen. Diese Tonleitern sind sehr mannigfacher, zum Teil, wie es aussieht, sehr willkürlicher Art, so daß viele uns ganz fremdartig und unbegreiflich erscheinen, während sie doch von den begabteren unter den Nationen, denen sie angehören, von den Griechen, Arabern und Indern außerordentlich subtil und mannigfaltig ausgebildet worden sind.

Bei der Besprechung dieser Tonsysteme ist nun für unseren vorliegenden Zweck die Frage von wesentlicher Wichtigkeit, ob in ihnen eine bestimmte Beziehung aller Töne der Leiter auf einen einzigen Haupt- und Grundton, die Tonika, zugrunde gelegen hat. Die neuere Musik bringt einen rein musikalischen inneren Zusammenhang in alle Töne eines Tonsatzes dadurch, daß alle in ein dem Ohr möglichst deutlich wahrnehmbares Verwandtschaftsverhältnis zu einer Tonika gesetzt werden. Wir können die Herrschaft der Tonika als des bindenden Mittelgliedes für sämtliche Töne des Satzes mit Fétis als das Prinzip der Tonalität bezeichnen. Dieser gelehrte Musiker hat mit Recht darauf aufmerksam gemacht, daß in den Melodien verschiedener Nationen die Tonalität in sehr verschiedenem Grade und verschiedener Weise entwickelt sei. Sie ist namentlich in den Liedern der Neugriechen, in den Gesangsformeln der griechischen Kirche und in dem Gregorianischen Gesang der römischen Kirche nicht in der Art entwickelt, daß diese Melodien leicht zu harmonisieren wären, während Fétis[1]) im ganzen fand, daß die alten Melodien der nordischen Völker germanischen, keltischen und slawischen Ursprunges sich leicht mit harmonischer Begleitung versehen lassen.

In der Tat ist es auffallend, daß in den musikalischen Schriften der Griechen, welche Subtilitäten oft in recht weitläufiger Weise behandeln und über alle möglichen anderen Eigentümlichkeiten der Tonleitern den genauesten Aufschluß geben, nichts deutlich gesagt ist über eine Beziehung, welche in dem modernen System allen anderen vorgeht und sich überall auf das deutlichste fühlbar macht. Die einzigen Hindeutungen auf die Existenz einer Tonika finden wir nicht bei den musikalischen Schriftstellern, sondern wieder bei Aristoteles[2]). Dieser fragt nämlich:

„Wenn jemand von uns den Mittelton (μέση) verändert, nachdem er die anderen Saiten gestimmt hat, und das Instrument gebraucht, warum klingt alles übel und scheint schlecht gestimmt, nicht nur, wenn er an den Mittelton kommt, sondern auch durch die ganze

[1]) Fétis' Biographie universelle des musiciens, Tl. I, p. 126.

[2]) Problemata 20 und 36. Im Anfang des letzteren ist nach einer Konjektur meines Kollegen Stark statt φθεγγόμεναι und φθέγγεται, was keinen vernünftigen Sinn gibt, zu setzen φθειρόμεναι und φθείρεται. — Die erste Stelle ist auch von Ambrosch schon teilweise zitiert.

andere Melodie? Wenn er aber den Lichanos oder irgend einen anderen Ton verändert hat, so tritt ein Unterschied nur hervor, wenn man gerade diesen gebraucht. Geschieht dies nicht mit gutem Grunde? Denn alle guten Melodien gebrauchen oft den Mittelton, und alle guten Komponisten kommen oft zum Mittelton hin, und wenn sie von ihm fortgehen, kehren sie bald wieder zurück, zu keinem anderen aber in gleicher Weise." Dann vergleicht er den Mittelton noch mit den Bindewörtern der Sprache, namentlich denen, welche „und" bedeuten und ohne die die Sprache nicht bestehen könne. „So auch ist der Mittelton wie ein Band der Töne, und namentlich der schönen, weil sein Ton am meisten vorhanden ist." An einer anderen Stelle finden wir dieselbe Frage wieder mit etwas geänderter Antwort: „Warum, wenn der Mittelton verändert wird, klingen auch die anderen Saiten wie verdorben? Wenn aber jener bleibt, und von den anderen eine verändert wird, so wird die veränderte allein verdorben. Ist dies so, weil sowohl das Gestimmtwerden allen zukommt, als auch allen ein gewisses Verhalten zum Mittelton, und durch diesen schon die Ordnung einer jeden gegeben ist? Wenn aber der Grund der Stimmung und das Zusammenhaltende weggenommen wird, so scheint Ordnung nicht mehr in gleicher Weise vorhanden zu sein." In diesen Sätzen ist die ästhetische Bedeutung einer Tonika, als welche hier der Mittelton genannt wird, so gut beschrieben, wie es nur irgend geschehen kann. Dazu kommt noch, daß von den Pythagoreern der Mittelton mit der Sonne, die anderen Töne der Leiter mit den Planeten verglichen werden[1]). Man scheint auch der Regel nach mit dem genannten Mittelton den Gesang begonnen zu haben, denn im 33. Problem des Aristoteles heißt es: „Warum ist es harmonischer, von der Höhe nach der Tiefe, als von der Tiefe zur Höhe zu gehen? Vielleicht weil jenes ist vom Anfang angefangen? Denn der Mittelton ist auch der höchst gelegene Führer des Tetrachordes (nämlich des unteren). Das andere aber hieße nicht vom Anfang, sondern vom Ende anfangen. Oder ist vielleicht das Tiefe nach dem Hohen edler und wohlklingender?" Daraus scheint aber auch hervorzugehen, daß man mit dem Mittelton, mit welchem man anfing, nicht zu schließen pflegte, sondern mit dem tiefsten Ton, der Hypate, von welcher

[1]) Nicomachus Harmonice Lib. I, p. 6. Edit. Meibomii.

letzteren wieder Aristoteles im vierten Problem sagt, daß diese im Gegensatz zu der dicht darüber liegenden Parhypate mit vollem Nachlaß jeder Anspannung gesungen werde, welche bei der anderen noch vorhanden sei. Diese Worte des Aristoteles werden wir jedenfalls auf die nationale dorische Skala der Hellenen anwenden dürfen, welche, von Pythagoras auf acht Töne erweitert, folgende war:

Tiefes Tetrachord
- *E* Hypate
- *F* Parhypate
- *G* Lichanos
- *A* Mese (Mittelton).

Höheres Tetrachord
- *H* Paramese
- *C* Trite
- *D* Paranete
- *E* Nete.

Nach moderner Ausdrucksweise liegt in der zuletzt zitierten Beschreibung des Aristoteles, daß die Parhypate eine Art absteigenden Leitton für die Hypate bildet. In dem Leitton ist die Anstrengung fühlbar, welche mit seinem Übergang in den Grundton aufhört.

Wenn nun der Mittelton der Tonika entspricht, so ist die Hypate deren Quinte, die Dominante. Für unser Gefühl ist es aber viel notwendiger, mit der Tonika zu schließen, als mit ihr anzufangen, und wir erklären deshalb gewöhnlich ohne weiteres den Schlußton eines Satzes für dessen Tonika. Doch läßt die moderne Musik der Regel nach die Tonika auch in dem ersten akzentuierten Taktteil des Anfanges hören. Die ganze Tonmasse entwickelt sich aus der Tonika heraus und kehrt wieder in sie zurück. Eine volle Beruhigung im Schluß ist nicht möglich, als indem die Tonreihe in das verbindende Zentrum des ganzen Satzes ausläuft.

In dieser Beziehung also scheint die ältere griechische Musik von der unserigen abgewichen zu sein, indem sie auf der Dominante endigte, nicht auf der Tonika. Übrigens steht dies in vollkommener Analogie mit der Betonung beim Sprechen. Wir haben gesehen, daß das Ende der bejahenden Sätze ebenfalls auf der nächst tieferen Quinte des Haupttones gebildet wird. Dieselbe Eigentümlichkeit ist auch in dem modernen Rezitativ meist beibehalten, in welchem die Gesangstimme auf der Dominante zu enden pflegt, wo sie von den Instrumenten mit dem Dominantseptimenakkord aufgenommen wird, dem der Akkord der Tonika folgt, um den für unser musikalisches Gefühl

nötigen Schluß in der Tonika zu bilden. Da nun die griechische Musik sich an der Rezitation von epischen Hexametern und jambischen Trimetern herangebildet hat, wird es uns nicht überraschen dürfen, wenn auch in den Melodien für Oden die erwähnten Eigentümlichkeiten des Sprechgesanges so herrschend blieben, daß Aristoteles sie als Regel betrachten konnte[1]).

Aus den angeführten Tatsachen geht hervor, worauf es für unseren Zweck besonders ankommt, daß den Griechen, bei denen sich unsere diatonische Leiter zuerst ausgebildet hat, das Gefühl für Tonalität in ästhetischer Beziehung nicht fehlte, daß es aber doch nicht so entschieden ausgebildet war, wie in der neueren Musik, und namentlich, wie es scheint, sich in den technischen Regeln der Melodiebildung durchaus nicht deutlich geltend machte. Daher ist eben Aristoteles, der die Musik als Ästhetiker behandelt, der einzige Schriftsteller, soweit bisher bekannt ist, der davon spricht; die eigentlich musikalischen Schriftsteller erwähnen es gar nicht. Leider sind auch die Andeutungen des Aristoteles so sparsam, daß Zweifel genug übrig bleiben. Namentlich erwähnt er nichts über die Verschiedenheiten der verschiedenen Tongeschlechter in bezug auf den Hauptton, so daß gerade der wichtigste Gesichtspunkt, aus dem wir den Bau der griechischen Tonleitern zu betrachten hätten, fast ganz im Dunkel bleibt.

Bestimmter findet sich die Beziehung auf eine Tonika ausgesprochen in den Tonleitern der altchristlichen Kirchenmusik. Man unterschied ursprünglich die vier sogenannten authentischen Tonleitern, wie sie vom Bischof Ambrosius von Mailand († 398) festgesetzt waren. Keine von diesen stimmt mit einer unserer Tonleitern überein; die später von Gregorius hinzugefügten vier plagalischen Tonreihen sind keine Tonleitern in unserem Sinne des Wortes. Die vier authentischen Tonleitern des Ambrosius sind:

1. *DEFGAHCD*
2. *EFGAHCDE*
3. *FGAHCDEF*
4. *GAHCDEFG*

[1]) Unter den angeblich antiken Melodien, welche uns überliefert sind, zeigt das von B. Marcello veröffentlichte Bruchstück aus der homerischen Ode an die Demeter die besprochene Eigentümlichkeit sehr deutlich.

Doch war die Veränderung des *H* in *B* vielleicht von Anfang an erlaubt; dadurch wurde dann die erste Tonleiter unserer absteigenden Molltonleiter gleich, die dritte eine *F*-Durtonleiter. Die alte Regel war, daß die Gesänge der ersten Leiter in *D* schlossen, die der zweiten in *E*, der dritten in *F*, der vierten in *G*. Dadurch waren also diese Töne in unserem Sinne als Tonika charakterisiert. Aber die Regel wurde nicht strenge gehalten. Man konnte auch in anderen Tönen der Leiter, sogenannten Konfinaltönen schließen, und schließlich wurde die Verwirrung so groß, daß niemand mehr recht zu sagen wußte, woran man die Tonart erkennen solle. Es wurden allerlei unzureichende Regeln aufgestellt, und man griff zu dem mechanischen Hilfsmittel, gewisse Anfangs- und Schlußphrasen, die sogenannten Tropen, festzusetzen, welche die Tonart charakterisieren sollten.

Obgleich man also bei diesen mittelalterlichen Kirchentonarten die Regel der Tonalität schon bemerkt hatte, war die Regel selbst doch so unsicher, und erlaubte soviel Ausnahmen, daß wir auch hier nicht zweifeln können, daß das Gefühl für die Tonalität viel unentwickelter gewesen sei, als in der modernen Musik.

Den Begriff der Tonika haben übrigens auch die Indier gefunden, deren Musik ebenfalls einstimmig ist. Sie nennen sie „Ansa“ [1]). Die indischen Melodien, wie sie von englischen Reisenden nachgeschrieben sind, erscheinen übrigens den modernen europäischen Melodien sehr ähnlich. Dasselbe haben Fétis und Coussemaker[2]) bemerkt in bezug auf die wenigen bekannten Reste altgermanischer und keltischer Melodien.

Wenn also auch die Beziehung auf einen vorherrschenden Ton, die Tonika, der einstimmigen Musik nicht ganz fehlt, so ist sie ohne Frage viel schwächer entwickelt gewesen als in der modernen Musik, wo wenige einander folgende Akkorde hinreichen, um festzustellen, in welcher Tonart die betreffende Stelle des Stückes sich bewegt. Es scheint mir dies seinen Grund zu haben in dem unentwickelten Zustande und in der untergeordneten Rolle, welche der homophonen Musik notwendig zukommen. Melodien, die sich in wenigen leicht übersehbaren Tönen auf und ab bewegen, die ihren Zusammenhang durch ein nicht musikalisches Hilfsmittel, nämlich die Worte der

[1]) Jones, Über die Musik der Indier, übersetzt von Dalberg. S. 36 u. 37.
[2]) Histoire de l'Harmonie au moyen âge. Paris 1852, p. 5—7.

Poesie schon haben, bedürfen keines konsequent durchgeführten musikalischen Bindemittels. Auch in dem modernen Rezitativ wird die Tonalität viel weniger festgehalten, als in anderen Kompositionsformen. Die Notwendigkeit einer festen Bindung der Tonmassen durch rein musikalische Beziehungen drängt sich dem Gefühl erst dann deutlicher auf, wenn große Massen von Tönen, die eine selbständige Bedeutung ohne Hilfe der Poesie haben sollen, künstlerisch zusammen zu schließen sind.

2. Polyphone Musik.

Der zweite Entwickelungsabschnitt der Musik ist die polyphone Musik des Mittelalters. Gewöhnlich wird als die zuerst erfundene vielstimmige Musik das sogenannte Organum oder die Diaphonie angeführt, wie sie der flandrische Mönch Hucbald im Anfang des 10. Jahrhunderts zuerst beschrieben habe. Dabei sollen zwei Stimmen in Quinten oder Quarten nebeneinander hergegangen, zuweilen auch Verdoppelungen einer oder beider in der Oktave hinzugefügt sein. Es gibt dies eine für uns unerträgliche Musik. Nach O. Paul[1]) hat es sich dabei aber nicht um eine gleichzeitige Ausführung beider Stimmen gehandelt, sondern um eine beantwortende Wiederholung einer Melodie in transponierter Lage, und Hucbald wäre somit als der Erfinder dieses später in der Fuge und Sonate so wichtig gewordenen Prinzips anzusehen.

Die erste unzweifelhafte Form prinzipmäßig mehrstimmiger Musik war der sogenannte Diskantus, welcher um das Ende des 11. Jahrhunderts in Frankreich und Flandern bekannt wurde. Die ältesten aufbewahrten Beispiele dieses Diskantus sind von der Art, daß zwei ganz verschiedene Melodien — und zwar schien man sie gern so verschiedenartig wie möglich zu wählen — aneinander gepaßt wurden durch kleine Veränderungen des Rhythmus oder der Tonhöhe, bis sie ein einigermaßen konsonierendes Ganzes bildeten. Zuerst scheint man namentlich gern eine liturgische Formel mit irgend einem schlüpfrigen Liedchen gepaart zu haben. Die ersten derartigen Beispiele können nicht wohl irgend eine andere Bedeutung gehabt haben, als daß es musikalische Kunststückchen zur gesellschaftlichen Unterhaltung waren.

[1]) Geschichte des Klaviers. Leipzig 1868, S. 49.

Es war eine neue Entdeckung, an der man sich amüsierte, daß zwei ganz verschiedene unabhängige Melodien nebeneinander gesungen werden konnten und gut zusammen klangen.

Das Prinzip des Diskantus war fruchtbar und von solcher Art, daß jene Zeit es entwickeln konnte; aus ihm ist die eigentliche polyphone Musik hervorgegangen. Verschiedene Stimmen, jede für sich selbständig und eine eigene Melodie tragend, sollten vereinigt werden, so daß sie keine oder wenigstens nur schnell vorübergehende und sich auflösende Mißklänge bildeten. Die Konsonanz an sich war nicht Zweck, nur ihr Gegenteil, die Dissonanz, sollte vermieden werden. Alles Interesse konzentrierte sich auf die Bewegung der Stimmen. Um die verschiedenen Stimmen zusammenzuhalten, war strenges Einhalten des Taktes nötig, es entwickelte sich deshalb unter dem Einfluß des Diskantus in reicher Mannigfaltigkeit das System der musikalischen Rhythmik, welches wiederum dazu beitrug, die Melodiebewegung kräftiger und eindringlicher zu machen. Der Gregorianische *Cantus firmus* kannte keine Takteinteilung, und die Rhythmik der Tanzmusik war wohl äußerst einfach gewesen. Außerdem wuchs der Reichtum und das Interesse der melodischen Bewegung in dem Maße, als sich die Stimmen vervielfältigten. Um aber zwischen den verschiedenen Stimmen einen künstlerischen Zusammenhang herzustellen, welcher anfangs, wie wir sahen, gänzlich fehlte, war noch eine neue Erfindung nötig. Diese tauchte zuerst in kleinen Anfängen auf, erlangte aber schließlich eine die ganze moderne Kompositionskunst beherrschende Wichtigkeit. Sie bestand darin, daß man die musikalische Phrase, welche eine Stimme vorgetragen hatte, durch eine andere wiederholen ließ; es entstanden also kanonische Nachahmungen, wie wir sie vereinzelt schon in Diskanten aus dem 12. Jahrhundert finden[1]). Diese entwickelten sich allmählich zu einem höchst künstlichen System, namentlich bei den niederländischen Komponisten, die freilich schließlich oft mehr Berechnung als Geschmack in ihren Kompositionen zeigten.

Aber durch diese Art der polyphonen Musik, die Wiederholung derselben Melodiewendungen hintereinander in verschiedenen Stimmen,

[1]) Coussemaker, l. c. Déchant: Custodi nos. Pl. XXVII, No. IV. Übersetzt in p. XXVII, No. XXIX.

war jetzt zuerst die Möglichkeit gegeben, große, breit angelegte musikalische Sätze zu komponieren, welche ihren künstlerischen Zusammenhang nicht mehr in der Verbindung mit einer fremden Kunst, der Poesie, sondern in rein musikalischen Mitteln fanden. Es paßte diese Art der Musik auch in hohem Grade für kirchliche Gesänge, in denen der Chor die Empfindungen einer ganzen, aus verschiedenartigen Individuen zusammengesetzten Gemeinde auszudrücken hatte. Aber man wendete sie nicht allein auf kirchliche Kompositionen an, sondern auch auf weltliche Gesänge, Lieder (Madrigale). Man kannte eben noch keine andere Form harmonischer Musik, welche künstlerisch ausgebildet gewesen wäre, als die auf kanonische Wiederholungen gegründete. Verschmähte man diese, so war man auf homophone Musik beschränkt. Daher finden sich denn auch eine Menge Lieder als strenge Kanons oder in kanonischen Wiederholungen komponiert, deren Inhalt ganz und gar nicht für eine so schwerfällige Weise geeignet ist. Auch die ältesten Beispiele mehrstimmiger Instrumentalkompositionen, Tanzstücke aus dem Jahre 1529[1]), sind in dem Stil der Madrigale und Motetten komponiert, einer Kompositionsweise, die sich in freierer Behandlung übrigens bis in die Suiten aus S. Bachs und Händels Zeit hinüberzieht. Selbst in den ersten Versuchen zu musikalischen Dramen im 16. Jahrhundert hatte man noch keine andere Form, die handelnden Personen ihre Gefühle musikalisch aussprechen zu lassen, als daß man durch einen Chor Madrigale in fugiertem Stil hinter oder auf der Bühne absingen ließ. Man kann sich von unserem Standpunkt aus kaum in den Zustand einer Kunst hineinversetzen, welche die kompliziertesten Stimmgebäude in ihren Chören aufbaut, und dabei nicht imstande ist, zu einer Liedermelodie oder zu einem Duett eine einfache Begleitung zu setzen, um die Harmonie vollständig zu machen. Und doch, wenn man liest, wie die Erfindung des Rezitativs mit einfacher Akkordbegleitung durch Jacob Peri gefeiert und bewundert wurde, welche Streitigkeiten sich über den Ruhm dieser Erfindung erhoben, welches Aufsehen Viadana erregte, indem er zu einstimmigen und zweistimmigen Gesängen einen *Basso continuo* zu setzen erfand, als eine in sich unselbständige Stimme, die nur der Harmonie dienen sollte[2]), so kann man nicht zweifeln,

[1]) Winterfeld, Johannes Gabrieli und sein Zeitalter 2, 41.

[2]) Winterfeld, l. c. 2, 19 u. 59.

daß diese Kunst, eine Melodie durch Akkorde zu begleiten, die jetzt jeder Dilettant in einfachster Weise zu lösen weiß, den Musikern bis zum Ende des 16. Jahrhunderts noch vollständig verborgen war. Erst im 16. Jahrhundert fing man an, sich der Bedeutung bewußt zu werden, welche die Akkorde als Teile des Harmoniegewebes unabhängig von der Stimmführung besitzen.

Diesem Zustand der Kunst entsprach der Zustand des Tonsystemes. Es wurden im wesentlichen die alten Kirchentonarten beibehalten, von denen die erste die Tonreihe von *D* bis *d*, die zweite von *E* bis *e*, die dritte von *F* bis *f*, die vierte von *G* bis *g* umfaßte. Unter diesen war die von *F* bis *f* gehende zur harmonischen Bearbeitung unbrauchbar, weil sie statt der Quarte *F—B* den Tritonus *F—H* enthielt. Andererseits war kein Grund vorhanden, die Reihen von *C* bis *c* und von *G* bis *g* auszuschließen. So veränderten sich die Kirchentonarten unter dem Einfluß der polyphonen Musik. Da man aber trotz der Veränderung die alten unpassenden Namen beibehielt, entstand eine arge Verwirrung in der Auffassung der Tonarten. Erst als das Ende dieser Periode herannahte, unternahm es ein gelehrter Theoretiker, Glareanus in seinem Dodecachordon (Basel 1547), die Lehre von den Tonarten wieder in Ordnung zu bringen. Er unterschied zwölf solche, sechs authentische und sechs plagalische, und teilte ihnen griechische Namen zu, die aber unrichtig übertragen waren. Doch ist seine Nomenklatur für die Kirchentonarten später allgemein beibehalten worden. Die authentischen Kirchentöne des Glareanus mit ihren griechischen Namen sind folgende sechs:

Ionisch . . . . *CDEFGAHC*
Dorisch . . . . *DEFGAHCD*
Phrygisch . . . *EFGAHCDE*
Lydisch . . . . *FGAHCDEF*
Mixolydisch . . *GAHCDEFG*
Äolisch . . . . *AHCDEFGA*

Ionisch entspricht unserem Dursystem, Äolisch unserem Moll; Lydisch ist in polyphoner Musik wegen der falschen Quarte kaum gebraucht worden, und immer nur mit allerlei Veränderungen.

Wie wenig man die musikalische Bedeutung des Harmoniegewebes zu beurteilen wußte, zeigt sich nun in der Lehre von den

Tonarten wieder darin, daß bei Beurteilung der Tonart einer polyphonen Komposition immer nur einzelne Stimmen berücksichtigt wurden. Glareanus schreibt in gewissen Kompositionen den verschiedenen Stimmen, dem Tenor und Baß, dem Sopran und Alt verschiedene Tonarten zu; Zarlino nimmt den Tenor als Hauptstimme, nach welcher die Tonart zu beurteilen sei.

Die praktischen Folgen dieser Nichtbeachtung der Harmonie zeigen sich mannigfaltig in den Kompositionen. Man beschränkte sich im ganzen auf die Töne der diatonischen Leiter; Versetzungszeichen wurden wenig angewendet. Die Erniedrigung des Tones *H* in *B* war schon bei den Griechen in einem eigenen Tetrachord, dem der Synemmenoi, eingeführt und wurde beibehalten. Außerdem wird zuweilen ein ♯ vor *f*, *c* und *g* gebraucht, um in den Kadenzen Leittöne zu gewinnen. Es fehlte also die Modulation in unserem Sinne aus der Tonart einer Tonika in die einer anderen mit anderen Vorzeichnungen fast ganz. Ferner blieben die bevorzugten Akkorde bis zum Ende des 15. Jahrhunderts die aus Oktaven und Quinten ohne Terz gebildeten, welche uns leer klingen, und die wir zu vermeiden suchen. Sie erschienen den Tonsetzern des Mittelalters als die wohlklingendsten, weil sie nur das Bedürfnis möglichst vollkommener Konsonanzen hatten; namentlich durften nur solche im Schlußakkord vorkommen. Die vorkommenden Dissonanzen sind allgemein solche, welche durch Vorhalt und Durchgangstöne eintreten; die Septimenakkorde, welche in der neueren Harmonie eine so große Wichtigkeit für die Bezeichnung der Tonart, für die Bindung und die Beschleunigung der harmonischen Schritte haben, fehlten.

So groß also auch die künstlerische Ausbeute dieses Zeitraumes in der Rhythmik und in der Kunst der Stimmführung gewesen ist, für die Harmonik und das Tonsystem hat er wenig mehr geleistet, als daß er eine Menge noch ungeordneter Erfahrungen zusammengehäuft hat. Da Akkorde durch die verwickelten Stimmgänge in mannigfachen Umlagerungen und Folgen entstanden, so konnten die Musiker dieses Zeitraumes nicht umhin, diese Akkorde zu hören und ihre Wirkung kennen zu lernen, wenn sie auch noch wenig Geschicklichkeit zeigen, solche Wirkungen zu benutzen. Jedenfalls bereiteten die Erfahrungen dieses Zeitraumes die Entwickelung der eigentlich

harmonischen Musik vor und machten es den Musikern möglich, eine solche zu produzieren, als äußere Einwirkungen auf eine solche Erfindung hindrängten.

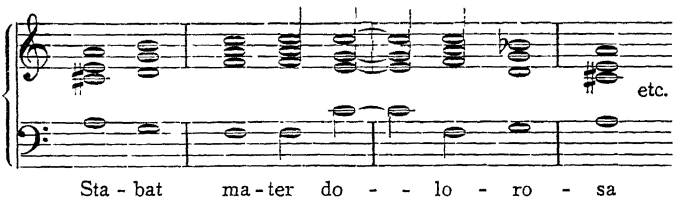
3. Die harmonische Musik.

Die moderne harmonische Musik ist dadurch charakterisiert, daß in ihr die Harmonie eine selbständige Bedeutung für den Ausdruck und für den künstlerischen Zusammenhang der Komposition erhält. Die äußeren Anstöße zu dieser Umformung der Musik waren mehrfacher Art. Der erste ging vom protestantischen Kirchengesang aus. Es lag im Prinzip des Protestantismus, daß die Gemeinde selbst den Gesang übernehmen mußte; man konnte ihr aber nicht zumuten, die künstlichen rhythmischen Verschlingungen der niederländischen Polyphonie durchzuführen. Dagegen waren die Stifter der neuen Konfession, Luther an ihrer Spitze, zu sehr durchdrungen von der Macht und Bedeutung der Musik, um dieselbe sogleich auf einen schmucklosen einstimmigen Gesang zurückzuführen. Es entstand deshalb für die Komponisten des protestantischen Kirchengesanges die Aufgabe, einfach harmonisierte Choräle zu setzen, in denen alle Stimmen gleichzeitig fortschritten. Dadurch waren die kanonischen Wiederholungen der gleichen melodischen Phrasen in verschiedenen Stimmen abgeschnitten, und diese waren es ja, welche hauptsächlich die Einheit des Ganzen zusammengehalten hatten. Es mußte nun im Klang der Töne selbst ein neues Verbindungsprinzip gesucht werden, und dies ergab sich durch die strengere Beziehung auf eine herrschende Tonika. Erleichtert wurde das Gelingen dieser Aufgabe dadurch, daß die protestantischen Kirchenlieder zum großen Teil schon bestehenden Volksmelodien angeschlossen wurden, und die Volkslieder der germanischen und keltischen Stämme, wie schon früher bemerkt wurde, ein festeres Gefühl für Tonalität im modernen Sinne verrieten, als die der südlichen Völker. So entwickelte sich schon in den protestantischen Kirchenliedern des 16. Jahrhunderts das System der Harmonie der ionischen Kirchentonart, unseres heutigen Dur, ziemlich korrekt, so daß wir in diesen Chorälen auch heute nichts Fremdartiges für unser Gefühl finden, wenn auch manche später erfundenen Hilfsmittel zur festen Bezeichnung der Tonart, wie z. B. die Septimenakkorde, noch fehlen. Dagegen dauerte es viel länger, ehe die

übrigen Kirchentonarten, in deren Harmonisierung noch viel Unsicherheit herrschte, in unser Mollsystem verschmolzen. Das protestantische Kirchenlied jener Zeit war von mächtiger Wirkung auf die Gemüter der Zeitgenossen, und diese wird von allen Seiten in den lebhaftesten Worten hervorgehoben, so daß man nicht zweifeln kann, der Eindruck einer solchen Musik sei für sie ein ganz neuer und besonders mächtiger gewesen.

Auch in der römischen Kirche verlangte man nach einer Änderung des Kirchengesanges. Die Ausschreitungen der polyphonen Kunst zerrissen den Sinn der Worte, machten diese unverständlich und machten es dem ungeübten, häufig wohl auch selbst dem gelehrten und gebildeten Hörer schwer, das Gewirr der Stimmen aufzulösen. Infolge der Verhandlungen des Tridentinischen Konzils und im Auftrage des Papstes Pius IV. hat Palestrina diese Vereinfachung und Verschönerung des Kirchengesanges vollführt, und soll durch die einfache Schönheit seiner Kompositionen die vollständige Verdrängung des mehrstimmigen Gesanges aus der römischen Liturgie verhindert haben. Palestrina, der für kunstgeübte Sängerchöre schrieb, ließ die verwickeltere Stimmführung der polyphonen Musik nicht ganz fallen, aber durch passende Abschnitte und Einteilungen gliederte er sowohl die Masse der Töne als die Masse der Stimmen, welche letzteren meist in mehrere Chöre gesondert erscheinen. Mehr oder weniger häufig treten auch die Stimmen choralmäßig nebeneinander hergehend auf, und zwar dann überwiegend in konsonanten Akkorden. Dadurch machte er seine Sätze übersichtlicher, verständlicher und im allgemeinen außerordentlich wohlklingend. Nirgends tritt aber die Abweichung der Kirchentonarten von den für die harmonische Behandlung ausgebildeten neueren Tonarten so auffallend hervor, wie bei Palestrina und den gleichzeitigen italienischen Kirchenkomponisten, unter denen Johannes Gabrieli, ein Venetianer, noch hauptsächlich zu nennen ist. Palestrina war der Schüler eines in der Bartholomäusnacht zu Lyon ermordeten Hugenotten, des Claude Goudimel, von dem harmonische Bearbeitungen der französischen Psalmen ausgeführt sind, die von der modernen Art und Weise nicht sehr viel abweichen, namentlich wo sie sich in Dur bewegen. Die Psalmenmelodien waren aber entweder Volksliedern entnommen oder solchen wenigstens nachgebildet. Durch seinen Lehrer war also

Palestrina jedenfalls mit dieser Weise der Behandlung bekannt, er hatte es aber zu tun mit Thematen aus dem Gregorianischen *Cantus firmus*, die in Kirchentonarten sich bewegten, deren Charakter streng festgehalten werden mußte, auch selbst in solchen Sätzen, deren Melodien er selbständig erfand oder umbildete. Diese Tonarten nötigten zu einer ganz anderen Weise harmonischer Behandlung, die uns sehr fremdartig klingt. Als Probe will ich hier nur den Anfang seines achtstimmigen *Stabat mater* zitieren:



Hier finden wir gleich als Anfang eines Stückes, wo wir feste Bezeichnung der Tonart verlangen würden, eine Reihe Akkorde aus den verschiedensten Tonarten von *A*-Dur bis *F*-Dur anscheinend regellos durcheinander gewürfelt, gegen alle unsere Regeln der Modulation. Und wer würde ohne Kenntnis der Kirchentonarten aus diesem Anfang die Tonika des Stückes erraten können? Als solche erscheint am Ende der ersten Strophe *D*, und auf das *D* weist auch die Erhöhung des *C* zu *Cis* im ersten Akkord hin, und die Hauptmelodie, welche der Tenor zu führen hat, läßt von Anfang an *D* als Tonika erkennen. Aber erst im achten Takt des Satzes erscheint ein *D*-Mollakkord, den ein moderner Komponist auf den ersten guten Taktteil des ersten Taktes hätte setzen müssen.

Es spricht sich in diesen Zügen sehr deutlich aus, wie abweichend die Natur des ganzen Systemes der Kirchentonarten von unseren modernen Tonarten war, denn wir dürfen von Meistern wie Palestrina sicher voraussetzen, daß ihre Harmonisierung sich auf ein richtiges Gefühl für das eigentümliche Wesen jener Tonarten gründete und nicht auf Willkür und Ungeschick, um so mehr ihnen die Fortschritte, welche inzwischen im protestantischen Kirchenlied gemacht waren, nicht unbekannt sein konnten.

Was wir in solchen Beispielen, wie dies angeführte eines ist, vermissen, ist erstens, daß der Akkord der Tonika nicht gleich im An-

fang die hervortretende Rolle spielt, die ihm in der modernen Musik zukommt. In dieser hat der tonische Akkord unter den Akkorden eben dieselbe hervorragende und verbindende Bedeutung, wie unter den Tönen der Tonleiter die Tonika. Zweitens vermissen wir überhaupt das Gefühl für die Verwandtschaft der aufeinander folgenden Akkorde, welches bewirkt, daß in der Regel die moderne Musik nur Akkorde aufeinander folgen läßt, welche durch einen gemeinsamen Ton miteinander verbunden sind. Es hängt dies offenbar damit zusammen, daß, wie wir später sehen werden, in den alten Kirchentonarten nicht so eng unter sich und mit dem tonischen Akkord verbundene Akkordketten herzustellen sind, wie in der modernen Dur- und Molltonart.

Wenn also auch bei Palestrina und Gabrieli sich schon eine feine künstlerische Empfindung für die ästhetische Wirkung der einzelnen verschiedenartigen Akkorde zu erkennen gibt, und insofern die Harmonien bei ihnen schon ihre selbständige Bedeutung haben, so fehlen doch noch diejenigen Erfindungen, welche den musikalischen Zusammenhang des Akkordgewebes in sich selbst herstellen sollten. Diese Aufgabe erforderte aber eine Beschränkung und Umformung der bisherigen Tonleitern auf unser Dur und Moll. Andererseits ging durch diese Beschränkung diejenige Mannigfaltigkeit des Ausdruckes größtenteils verloren, welche auf der Verschiedenartigkeit der Tonleitern beruhte. Die alten Tonleitern bilden teils Zwischenstufen zwischen Dur und Moll, teils steigern sie noch den Charakter der Molltonart, wie die phrygische Kirchentonart. Diese Verschiedenheit ging verloren und mußte durch neue Hilfsmittel ersetzt werden, nämlich durch die Transposition der Tonleitern in verschiedene Grundtöne und die modulatorischen Übergänge von einer zur anderen Tonart.

Diese Umbildung vollzog sich im Laufe des 17. Jahrhunderts. Den lebhaftesten Anstoß aber erhielt die Ausbildung harmonischer Musik durch beginnende Entwickelung der Oper, welche angeregt war durch die erneute Bekanntschaft mit dem klassischen Altertum, und geradezu unternommen wurde in der Absicht, die antike Tragödie wieder herzustellen, von der man wußte, daß sie musikalisch rezitiert worden sei. Hier drängte sich unmittelbar die Aufgabe dem Komponisten auf, eine oder wenige Solostimmen musikalische Sätze aus-

führen zu lassen, welche doch harmonisiert sein mußten, um zwischen die polyphonisch bearbeiteten Chöre hineinzupassen, und in denen die Singstimmen vor allen anderen heraustreten, die begleitenden Stimmen ganz untergeordnet gehalten werden mußten. Dadurch ergab sich zunächst die Erfindung des Rezitativs durch Jacob Peri und Caccini um 1600, und arioser Sologesänge durch Claudio Monteverde und Viadana. In der Notenschrift kündet sich die neue Betrachtungsweise der Harmonie dadurch an, daß bei diesen Komponisten die bezifferten Bässe erscheinen. Jede solche bezifferte Baßnote repräsentiert einen Akkord, und es werden also die Akkorde bezeichnet, während die Führung der Stimmen in diesen Akkorden dem Geschmack des Spielers überlassen bleibt. Was also in der polyphonen Musik Nebensache war, wird hier Hauptsache, und umgekehrt.

Die Oper machte es auch notwendig, nach stärkeren Ausdrucksmitteln zu suchen, als die Kirchenmusik zugelassen hatte. Bei Monteverde, welcher an neuen Erfindungen ungemein reich war, finden wir die Septimenakkorde zuerst frei einsetzend, worüber er von seinem Zeitgenossen Artusi heftig getadelt wird. Überhaupt entwickelt sich schnell ein kühnerer Gebrauch der Dissonanzen, welche in selbständiger Bedeutung, um schärfere Schattierungen des Ausdruckes zu erreichen, und nicht mehr als zufällige Ergebnisse der Stimmführung eintreten.

Unter diesen Einflüssen begann denn auch schon bei Monteverde die Umgestaltung und Verschmelzung der dorischen, äolischen und phrygischen Kirchentonart in unsere moderne Molltonart, welche im Laufe des 17. Jahrhunderts sich vollzog, wodurch auch diese Tonarten für die Hervorhebung der Tonika in der Harmonisierung geschickter gemacht wurden, wie wir dies später genauer begründen werden.

Wir haben der Hauptsache nach schon bezeichnet, welchen Einfluß diese Änderungen auf die Natur des Tonsystemes hatten. Da das bisherige Bindemittel der musikalischen Sätze, nämlich die kanonische Wiederholung gleicher melodischer Figuren, überall wegfallen mußte, wo eine der Melodie untergeordnete einfache harmonische Begleitung eintrat, so mußte im Klang der Akkorde selbst ein neues Mittel künstlerischen Zusammenhanges gesucht werden; dies ergab

sich, indem man durch die Harmonisierung einmal die Beziehungen der Töne zu der einen herrschenden Tonika viel bestimmter konnte hervortreten lassen, als dies früher der Fall war, und zweitens, indem man den Akkorden selbst durch ihre Verwandtschaft untereinander und zum tonischen Akkord ein neues Band gab. Wir werden im Fortgang unserer Untersuchung sehen, daß sich aus diesem Prinzip die unterscheidenden Eigentümlichkeiten des modernen Tonsystemes herleiten lassen, und daß dieses Prinzip mit großer Konsequenz in unserer jetzigen Musik durchgeführt ist. In der Tat ist die Art, wie das Tonmaterial der Musik jetzt für den künstlerischen Gebrauch zurecht gemacht ist, an sich schon ein bewunderungswürdiges Kunstwerk, an welchem die Erfahrung, der Scharfsinn und der künstlerische Geschmack der europäischen Nationen seit Terpander und Pythagoras nun drittehalb Jahrtausende gearbeitet haben. Die Ausbildung der wesentlichen Züge seiner jetzigen Gestalt ist aber kaum 200 Jahre alt in der Praxis der Tonsetzer, und seinen theoretischen Ausdruck erhielt das neue Prinzip erst durch Rameau im Anfang des vorigen Jahrhunderts. In weltgeschichtlicher Beziehung ist es also ganz und gar Produkt des neueren Zeitalters, national beschränkt auf die germanischen, romanischen, keltischen und slawischen Völker.

Mit diesem Tonsystem, welches großen Reichtum von Formen bei fest geschlossener künstlerischer Konsequenz zuließ, ist es nun möglich geworden, Kunstwerke zu schaffen, viel größer an Umfang, viel reicher in Formen und Stimmen, viel energischer im Ausdruck, als irgend eine vorausgegangene Zeit produzieren konnte, und wir sind deshalb gar nicht geneigt, mit den modernen Musikern zu rechten, wenn sie es für das vorzüglichste von allen erklären und ihm ihre Aufmerksamkeit vor allen anderen ausschließlich zuwenden. In wissenschaftlicher Beziehung dagegen, wenn wir daran gehen, seinen Bau zu erklären und die Konsequenz desselben aufzudecken, dürfen wir nicht vergessen, daß das moderne System nicht aus einer Naturnotwendigkeit entwickelt ist, sondern aus einem frei gewählten Stilprinzip, daß neben ihm und vor ihm andere Tonsysteme aus anderen Prinzipien entwickelt worden sind, in deren jedem gewisse beschränktere Aufgaben der Kunst so gelöst worden sind, daß der höchste Grad künstlerischer Schönheit erreicht wurde.

Die Beziehung auf die Geschichte der Musik wird in der vorliegenden Abteilung unseres Werkes auch deshalb nötig, weil wir hier Beobachtung und Experiment zur Feststellung der von uns aufgestellten Erklärungen meist nicht anwenden können, denn wir können uns, erzogen in der modernen Musik, nicht vollständig zurückversetzen in den Zustand unserer Vorfahren, die das alles nicht kannten, was uns von Jugend auf geläufig ist, und es erst zu suchen hatten. Die einzigen Beobachtungen und Versuche also, auf die wir uns berufen können, sind diejenigen, welche die Menschheit in ihrem Entwickelungsgang über musikalische Dinge angestellt hat. Wenn unsere Theorie des modernen Tonsystemes richtig ist, muß dieselbe auch die Erklärung für die früheren unvollkommeneren Stadien der Entwickelung abgeben können.

Als Grundprinzip für die Entwickelung des europäischen Tonsystemes stellen wir die Forderung auf, daß die ganze Masse der Töne und Harmonieverbindungen in enge und stets deutliche Verwandtschaft zu einer frei gewählten Tonika zu setzen sei, daß aus dieser sich die Tonmasse des ganzen Satzes entwickele und in sie wieder zurücklaufe. Die antike Welt entwickelte dieses Prinzip an homophoner Musik, die moderne an harmonischer. Dieses Prinzip ist aber, wie man sieht, ein ästhetisches, kein natürliches.

Wir können seine Richtigkeit nicht von vornherein erweisen, wir müssen sie an seinen Konsequenzen prüfen. Auch ist die Entstehung solcher ästhetischer Grundprinzipien nicht einer Naturnotwendigkeit zuzuschreiben, sondern sie sind Produkte genialer Erfindung, wie wir vorher an den Prinzipien der architektonischen Stilarten als Beispielen erläutert haben.

Vierzehnter Abschnitt.

Die Tonalität der homophonen Musik.

Die Musik hat sich das Material, in welchem sie ihre Werke schafft, selbst künstlerisch auswählen und gestalten müssen. Die bildenden Künste finden es der Hauptsache nach vorgebildet in der Natur, die sie nachzuahmen streben; Farben und Gestalten sind dort in ihren Grundzügen gegeben. Die Poesie findet es in den Worten der Sprache fertig vorgebildet. Die Architektur freilich muß sich ihre Formen ebenfalls selbst schaffen; aber sie werden ihr zum Teil durch technische, nicht rein künstlerische Rücksichten aufgedrängt. Die Musik allein findet ein unendlich reiches, ganz ungeformtes und ganz freies Material vor in den Tönen der menschlichen Stimme und der künstlichen Musikinstrumente, welches nach rein künstlerischen Prinzipien zu gestalten ist, ohne daß Nützlichkeitsrücksichten wie in der Architektur, oder Nachahmung der Natur wie in den bildenden Künsten, oder schon fertig vorgefundene symbolische Bedeutung der Klänge wie in der Poesie irgend eine Schranke anlegten. In der Musik herrscht eine größere und vollkommenere Freiheit im Gebrauch des Materials als in irgend einer der anderen Künste. Aber von der absoluten Freiheit ist es freilich schwerer, einen richtigen Gebrauch zu machen, als wo äußere zwingende Anhaltspunkte die Breite des Weges einschränken, welchen der Künstler zu betreten hat. Daher denn auch die Ausbildung des Tonmaterials für die Musik, wie wir gesehen haben, viel langsamer von statten gegangen ist, als die Entwickelung der übrigen Künste.

Diese Ausbildung des Tonmaterials haben wir nun zu untersuchen.

Die erste Tatsache, welche uns entgegentritt, ist, daß in der Musik aller Völker, soweit wir sie kennen, die Veränderung der Ton-

höhe in den Melodien stufenweise und nicht in kontinuierlichem Übergang erfolgt. Der psychologische Grund dazu scheint derselbe gewesen zu sein, welcher zur Abteilung rhythmisch sich wiederholender Taktabschnitte genötigt hat. Alle Melodie ist eine Bewegung innerhalb der wechselnden Tonhöhe. Das unkörperliche Material der Töne ist viel geeigneter, in jeder Art der Bewegung auf das Feinste und Fügsamste der Absicht des Musikers zu folgen, als irgend ein anderes noch so leichtes körperliches Material; anmutige Schnelligkeit, schwere Langsamkeit, ruhiges Fortschreiten, wildes Springen, alle diese verschiedenen Charaktere der Bewegung und noch eine unzählbare Menge von anderen lassen sich in den mannigfaltigsten Schattierungen und Kombinationen durch eine Folge von Tönen darstellen, und indem die Musik diese Arten der Bewegung ausdrückt, gibt sie darin auch einen Ausdruck derjenigen Zustände unseres Gemütes, welche einen solchen Charakter der Bewegung hervorzurufen imstande sind, sei es nun, daß es sich um Bewegungen des menschlichen Körpers oder der Stimme, oder noch innerlicher, selbst um Bewegung der Vorstellungen im Bewußtsein handeln möge. Jede Bewegung ist uns ein Ausdruck der Kräfte, durch welche sie hervorgebracht wird, und wir wissen instinktiv die treibenden Kräfte zu beurteilen, wenn wir die von ihnen hervorgebrachte Bewegung beobachten. Dies gilt ebenso und vielleicht noch mehr für die durch Kraftäußerungen des menschlichen Willens und der menschlichen Triebe hervorgebrachten Bewegungen, wie für die mechanischen Bewegungen der äußeren Natur. In dieser Weise kann denn die melodiöse Bewegung der Töne Ausdruck werden für die verschiedensten menschlichen Gemütszustände, nicht für eigentliche Gefühle — darin müssen wir Hanslick anderen Ästhetikern gegenüber recht geben, denn es fehlt der Musik das Mittel, den Gegenstand des Gefühles deutlich zu bezeichnen, wenn ihr nicht die Poesie zu Hilfe kommt —, wohl aber für die Gemütsstimmung, welche durch Gefühle hervorgebracht wird. Das Wort Stimmung ist offenbar von der Musik entnommen und auf Zustände unserer Seele übertragen; es sollen dadurch eben diejenigen Eigentümlichkeiten der Seelenzustände bezeichnet werden, welche durch Musik darstellbar sind, und ich meine, wir können es passend so definieren, daß wir unter Gemütsstimmung zu verstehen haben den allgemeinen Charakter, den zeitweilig die Fortbewegung

unserer Vorstellungen an sich trägt, und der sich dementsprechend auch in einem ähnlichen Charakter der Bewegungen unseres Körpers und unserer Stimme zu erkennen gibt. Unsere Gedanken können sich schnell oder langsam bewegen, sie können ruhelos und ziellos herumirren in ängstlicher Aufregung, oder mit Bestimmtheit und Energie ein festgesetztes Ziel ergreifen; sie können sich behaglich und ohne Anstrengung in angenehmen Phantasien herumtreiben lassen, oder an eine traurige Erinnerung gebannt, langsam und schwerfällig von der Stelle rücken in kleinen Schritten und kraftlos. Alles dieses kann durch die melodische Bewegung der Töne nachgeahmt und ausgedrückt werden, und es kann dadurch dem Hörer, der dieser Bewegung aufmerksam folgt, ein vollkommeneres und eindringlicheres Bild von der Stimmung einer anderen Seele gegeben werden, als es durch ein anderes Mittel, ausgenommen etwa durch eine sehr vollkommene dramatische Nachahmung der Handlungweise und Sprechweise des geschilderten Individuums, geschieht.

Übrigens hat schon Aristoteles die Wirkung der Musik ganz ähnlich aufgefaßt. Im 29. Problem fragt er: „Warum passen die Rhythmen und die Melodien, welche Schall sind, sich den Gemütsstimmungen an, die Geschmäcker aber nicht und auch nicht die Farben und die Gerüche? Etwa weil sie Bewegungen sind, so wie auch die Handlungen? Schon die darin liegende Energie beruht auf einer Stimmung und macht eine Stimmung. Die Geschmäcker aber und Farben tun es nicht in gleicher Weise.“ Und am Ende des 27. Problemes sagt derselbe: „Diese Bewegungen (der Rhythmen und Melodien nämlich) sind tatkräftig, Taten aber sind die Zeichen der Gemütsstimmung.“

Nicht bloß Musik, sondern auch andere Arten der Bewegung können ähnliche Wirkungen hervorbringen. Namentlich bietet das bewegte Wasser, sei es in Wasserfällen, sei es im Wogen des Meeres, das Beispiel eines Eindruckes, der einem musikalischen einigermaßen ähnlich ist. Wie lange und wie oft kann man am Ufer sitzen und den anlaufenden Wogen zusehen! Ihre rhythmische Bewegung, welche doch im einzelnen fortdauernden Wechsel zeigt, bringt ein eigentümliches Gefühl von behaglicher Ruhe ohne Langeweile hervor, und den Eindruck eines mächtigen, aber geordneten und schön gegliederten Lebens. Wenn die See ruhig und glatt ist, kann man sich eine Weile

an ihren Farben freuen, aber sie gewährt keine so dauernde Unterhaltung, als wenn sie wogt. Kleine Wellen dagegen auf kleineren Wasserflächen folgen sich zu hastig und beunruhigen mehr, als daß sie unterhalten.

Die Tonbewegung aber ist allen Bewegungen körperlicher Massen überlegen in der Freiheit und Leichtigkeit, mit der sie die mannigfaltigsten Arten des Ausdruckes annehmen und nachahmen kann, daher ihr die Schilderung der Stimmungen hauptsächlich zufällt, welche die übrigen Künste nur mittelbar erreichen können, indem sie die Veranlassungen darstellen, welche die Stimmung hervorgebracht haben, oder die Worte, die Handlungen, die äußere Erscheinung des Körpers, die aus ihr folgen. Am bedeutendsten ist die Verbindung der Musik mit dem Wort, weil das Wort die Veranlassung der Stimmung, das Objekt, worauf sie sich bezieht, bezeichnen und das Gefühl, welches ihr zugrunde liegt, angeben kann, während die Musik die Art der Gemütsbewegung ausdrückt, die dem Gefühl verbunden ist. Wenn verschiedene Hörer den Eindruck von Instrumentalmusik zu schildern suchen, tun sie es oft, indem sie ganz verschiedene Situationen oder Gefühle angeben, welche in der Musik geschildert worden seien. Der Unkundige verlacht dann wohl solche Enthusiasten, und doch können sie alle mehr oder weniger recht haben, weil die Musik nicht die Gefühle und Situationen schildert, sondern nur die Stimmungen, welche der Hörer aber nicht anders zu bezeichnen weiß, als durch Schilderung solcher äußeren Verhältnisse, unter denen dergleichen Stimmungen bei ihm einzutreten pflegen. Es können aber verschiedene Gefühle unter verschiedenen Umständen und bei verschiedenen Individuen gleiche Stimmungen, und gleiche Gefühle verschiedene Stimmungen hervorbringen. Liebe ist ein Gefühl. Direkt als solche kann sie nicht durch die Musik dargestellt werden. Die Stimmungen eines Liebenden können bekanntlich den äußersten Grad des Wechsels zeigen. Nun kann die Musik etwa das träumerische Sehnen nach überschwänglicher Glückseligkeit ausdrücken, welches durch Liebe hervorgerufen werden kann. Genau dieselbe Stimmung kann aber auch durch religiöse Schwärmerei entstehen. Wenn also ein Musikstück diese Stimmung ausdrückt, liegt kein Widerspruch darin, wenn der eine Hörer darin die Sehnsucht der Liebe, der andere die Sehnsucht frommer Begeisterung findet. In diesem Sinne ist Vischers etwas paradox klingender Ausdruck nicht unrichtig, daß

man die Mechanik der Gemütsbewegungen vielleicht am besten werde an ihrem musikalischen Ausdruck studieren können. In der Tat besitzen wir kein anderes Mittel, sie so genau und fein auszudrücken, wie das ihrer musikalischen Darstellung.

Es soll also, wie wir gesehen haben, die Melodie eine Bewegung ausdrücken, und zwar so, daß der Charakter dieser Bewegung sich der unmittelbaren Wahrnehmung des Hörers leicht, deutlich und sicher zu erkennen gibt. Dies kann nur geschehen, wenn die Schritte dieser Bewegung, ihre Schnelligkeit, ihre Größe auch für die unmittelbar sinnliche Wahrnehmung genau abmeßbar sind. Die melodische Bewegung ist Veränderung der Tonhöhe in der Zeit. Um sie vollständig zu messen, muß sowohl die Länge der verlaufenden Zeit, als auch die Breite der Veränderung in der Tonhöhe meßbar sein. Beides kann für die unmittelbare Beobachtung nur geschehen, wenn der Fortschritt sowohl in der Zeit, als in der Tonhöhe in regelmäßigen und fest bestimmten Stufen geschieht. Für die Zeit ist dies unmittelbar klar, denn alle unsere Zeitmessung, auch die wissenschaftliche, beruht auf der rhythmischen Wiederkehr gleicher Ereignisse, auf dem Umlauf der Erde, des Mondes, den Schwingungen des Pendels. So erhalten wir auch durch den regelmäßigen Wechsel akzentuierter und nicht akzentuierter Laute in Musik und Poesie das dem Kunstwerk mitgegebene Zeitmaß. Während aber in der Poesie der Versbau nur dazu dient, auch in die äußerlichen Zufälligkeiten des Sprachausdruckes künstlerische Ordnung zu bringen, gehört in der Musik der Rhythmus, gleichsam als der geteilte Maßstab für die Zeit, zum innersten Wesen ihres Ausdruckes; daher denn auch eine viel feinere und mannigfaltigere Ausbildung des musikalischen Rhythmus als des poetischen nötig wurde.

Auch für die Änderung der Tonhöhe ist stufenweiser Fortschritt nötig, weil überhaupt Bewegung für die Anschauung nicht anders abzumessen ist, als wenn die Breite des durchmessenen Raumes in Stufen abgeteilt ist. Auch in wissenschaftlichen Untersuchungen können wir ja die Geschwindigkeit einer kontinuierlichen Bewegung nicht anders messen, als indem wir den durchlaufenen Raum mit dem Maßstab messen, wie die Zeit durch die Sekundenschläge.

Man könnte mir einwerfen, daß die Architektur in ihren Arabesken, welche man in vielen Beziehungen und mit Recht mit

musikalischen Figuren verglichen hat, und welche ebenfalls einen gewissen Ausdruck geordneter Bewegung in sich tragen, vielfältig kontinuierlich gekrümmte Linien, statt stufenförmig gebrochener anwendet. Aber erstens begann die Kunst der Arabesken in der Tat mit der griechischen Mäanderlinie, welche aus rechtwinkelig gestellten geraden Linien zusammengesetzt ist, die in genau gleichen Abständen voneinander verlaufen und stufenförmig sich absetzen. Zweitens kann das Auge, welches Arabesken überschaut, alle Teile der geschwungenen Linie gleichzeitig übersehen und vergleichen, es kann hin und her gehen, das früher Gesehene wiedersehen; daher bleibt die Führung der Linien trotz ihrer kontinuierlichen Krümmung vollständig übersichtlich, und es konnte die strengere Regelmäßigkeit der griechischen Arabeskenmuster mit gutem Erfolg für die Freiheit dieses Kunstzweiges aufgegeben werden. Während aber so in den einzelnen kleinen Verzierungen der Architektur freiere Formen zugelassen sind, wird für die Gliederung eines größeren Ganzen, sei es einer Arabeskenreihe oder der Reihe der Fenster, Säulen usw. eines ganzen Gebäudes, doch immer das einfache arithmetische Gesetz der stufenweisen Wiederholung gleicher Teile in gleichen Abständen festgehalten.

Von einer Melodie treten uns die einzelnen Teile nacheinander an das Ohr; wir können sie nicht alle zugleich in der Wahrnehmung haben, wir können nicht nach Belieben beobachtend vor- und zurückgehen, es bleibt also für eine klare und sichere Abmessung des Wechsels der Tonhöhe kein anderes Mittel, als der Fortschritt in fest bestimmten Stufen. Eine solche Stufenreihe ist vorgeschrieben in der musikalischen Tonleiter. Wenn der Wind heult, und seine Tonhöhe in allmählichen Übergängen ohne Absatz bald steigt, bald fällt, so fehlt diesen Veränderungen der Tonhöhe jedes Maß, mittels dessen wir die späteren Laute mit den früheren vergleichen und die Breite der Veränderung überschauen könnten. Das Ganze macht einen wirren und unangenehmen Eindruck. Die musikalische Tonleiter ist gleichsam der eingeteilte Maßstab, an dem wir den Fortschritt in der Tonhöhe messen, wie der Rhythmus dasselbe für die Zeit ist. Die Analogie zwischen Tonleiter und Rhythmus ist deshalb auch den musikalischen Theoretikern der ältesten wie der jüngsten Zeit immer aufgefallen.

Darüber also finden wir von der ältesten Zeit bis zur neuesten und bei allen Nationen, die überhaupt musizieren, allgemeinste Über-

einstimmung, daß von den unendlich vielen kontinuierlich ineinander übergehenden Graden der Tonhöhe, welche möglich sind und vom Ohr wahrgenommen werden können, gewisse bestimmte Stufen ausgeschieden werden, welche die Tonleiter bilden, in der sich die Melodie bewegt. Welche besonderen Tonstufen aber ausgewählt werden, ist eine Frage, bei deren Entscheidung die Abweichungen des nationalen Geschmackes sichtbar werden, denn die Zahl der Tonleitern, welche bei verschiedenen Völkern und in verschiedenen Zeiten gebraucht worden sind, ist ziemlich groß.

Fragen wir also, welcher Grund kann da sein, wenn wir von einem gewissen Anfangston ausgehen, den Schritt nach irgend einem bestimmten anderen Ton zu bevorzugen vor den Schritten nach seinen Nachbartönen? Wir erinnern uns dabei, daß schon beim Zusammenklang je zweier Töne ein solches Verhältnis von uns bemerkt worden ist. Es ergab sich dort, daß gewisse besondere Tonintervalle, nämlich die Konsonanzen, sich im Zusammenklang vor allen von ihnen auch nur wenig verschiedenen Intervallen durch den Mangel der Schwebungen auszeichneten. Einige dieser Intervalle, die Oktave, die Quinte und Quarte finden wir nun auch in allen bekannten Tonleitern wieder. Die neueren Theoretiker, welche im System der harmonischen Musik aufgewachsen waren, haben deshalb geglaubt, den Ursprung der Tonleiter durch die Annahme erklären zu können, daß alle Melodie entstehe, indem man sich eine Harmonie dabei denke, und die Tonleiter, als die Hauptmelodie der Tonart, entstanden sei durch Auflösung der Grundakkorde der Tonart in ihre einzelnen Töne. Diese Ansicht ist für die modernen Tonleitern allerdings richtig; wenigstens sind diese modifiziert worden nach den Erfordernissen der Harmonie. Aber Tonleitern sind historisch längst vorhanden gewesen, noch ehe irgend welche Erfahrungen über Harmonie vorlagen. Und wenn man in der Geschichte der Musik überblickt, wie lange Zeit die europäischen Musiker gebraucht haben, um eine Melodie harmonisch begleiten zu lernen, und wie ungeschickt die ersten Versuche darin ausfielen, so kann es nicht zweifelhaft sein, daß ein Gefühl für harmonische Begleitung bei den älteren Komponisten der homophonen Musik keineswegs existiert habe, so wie sich denn auch jetzt noch viele der begabteren Orientalen gegen unsere harmonische Musik sträuben. Auch das ist zu beachten, daß viele Volksmelodien, teils aus älterer

Zeit, teils fremdländischen Ursprunges, kaum eine harmonische Begleitung zulassen, die ihren Charakter nicht zerstört.

Ebenso ist es mit Rameaus Annahme eines subintendierten Fundamentalbasses bei der Konstruktion einer einstimmigen Melodie oder einer Tonleiter. Ein neuerer Komponist wird sich allerdings meist sogleich den Fundamentalbaß zu einer Melodie denken, die er erfindet. Aber Musiker, welche noch nie harmonische Musik gehört haben, und keine solche zu setzen verstehen, wie sollen die es können? Es ist hier offenbar dem allerdings unbewußt viele Beziehungen herausfühlenden Künstlergeist zuviel zugemutet, wenn man behauptet, er solle Beziehungen der Töne beachten, die er nie oder wenigstens nur selten mit leiblichem Ohr vernommen hat, und die erst eine ferne Nachwelt herauszufinden und zu benutzen bestimmt war.

Aber wenn es auch klar ist, daß in den Perioden der rein homophonen Musik die Tonleiter nicht nach den Bedürfnissen unbewußt dazu gedachter Akkordverbindungen konstruiert werden konnte, so kann doch die angeführte Ansicht und Hypothese der Musiker in etwas abgeänderter Fassung einen Sinn erhalten, wenn wir nämlich annehmen, daß dieselben physikalischen und physiologischen Beziehungen der Klänge, welche sich bei den Zusammenklängen geltend machen und die Größe der konsonanten Intervalle bestimmen, auch in der Konstruktion der Tonleiter, wenn auch unter abgeänderten Bedingungen, wirksam sein können.

Beginnen wir mit der Oktave, deren Beziehung zum Grundton die auffallendste ist. Es sei irgend eine Melodie von irgend einem Instrument, welches eine gute musikalische Klangfarbe hat, etwa einer menschlichen Stimme, ausgeführt worden, so hat der Hörer außer den Grundtönen der Klänge auch deren höhere Oktaven und schwächer die übrigen Obertöne gehört. Wenn nun eine höhere Stimme dieselbe Melodie nachher in der höheren Oktave ausführt, so hören wir einen Teil dessen wieder, was wir eben gehört haben, nämlich die geraden Teiltöne der früheren Klänge, und wir hören dabei nichts Neues, was wir nicht schon gehört hätten. Es ist daher Wiederholung einer Melodie in der höheren Oktave eine wirkliche Wiederholung des schon Gehörten, zwar nicht des Ganzen, aber doch eines Teiles. Wenn wir eine tiefe Stimme von einer höheren in der Oktave begleiten lassen, die einzige mehrstimmige Musik, welche die

Griechen anwendeten, so fügen wir der tieferen nichts Neues hinzu, sondern verstärken nur die geradzahligen Teiltöne derselben. In diesem Sinne sind also die Klänge einer höheren Oktave wirkliche Wiederholungen der Klänge der tieferen Oktaven, wenigstens eines Bestandteiles derselben. Daher ist die erste und oberste Haupteinteilung unserer musikalischen Skala die in eine Reihe von Oktaven, und wir betrachten in Beziehung auf Melodie und Harmonie die gleichnamigen Töne verschiedener Oktaven als gleichgeltend, was in dem angegebenen Sinne und bis zu einer gewissen Grenze richtig ist. Die Begleitung in der Oktave gibt vollkommene Konsonanz, aber sie gibt nichts Neues, sondern nur eine Verstärkung schon vorhandener Töne. Sie ist deshalb musikalisch anwendbar zur Verstärkung einer Melodie, welche kräftig herausgehoben werden soll, aber ihr fehlt die Mannigfaltigkeit der polyphonischen Musik, sie erscheint daher eintönig, und ist verboten, wo die Musik polyphonisch sein soll.

Was von der Oktave gilt, gilt in geringerem Grade auch von der Duodezime. Wird eine Melodie in der Duodezime wiederholt, so wird ebenfalls schon Gehörtes wieder gehört, nur daß der Bestandteil des Gehörten, welcher wiederholt wird, viel schwächer ist, indem nur der dritte, sechste, neunte usw. Teilton wieder angegeben werden, während bei der Wiederholung in der Oktave für den dritten der stärkere zweite und vierte, für den neunten der achte und zehnte auftreten usw. Die Wiederholung der Melodie in der Duodezime ist also unvollkommener, als die in der Oktave, weil nur ein kleinerer Teil des Gehörten wiederholt wird. Statt ihrer kann nun auch die Wiederholung eine Oktave tiefer in der Quinte eintreten. Die Wiederholung in der Quinte ist keine reine Wiederholung, wie es die Wiederholung in der Duodezime ist. Wenn die Schwingungszahl des Grundtones 2 ist, so sind Teiltöne

des Grundklanges	2	4	6	8	10	12
der Duodezime			6			12
der Quinte	3		6		9	12

Wenn wir die Duodezime angeben, wiederholen wir die Töne 6 und 12, die schon im Grundklang waren. Wenn wir die Quinte angeben, wiederholen wir zwar dieselben Töne auch, aber wir bringen noch neue Töne, nämlich 3 und 9, hinzu. Bei der Wiederholung in der Quinte ist also nur ein Teil des Neuen identisch mit einem Teil

des früher Gehörten, aber es ist die am meisten vollkommene Wiederholung, die wir in einem kleineren Abstand als einer Oktave machen können. Hiervon rührt es offenbar her, daß man noch jetzt ungeübte Sänger, wenn sie mit anderen im Chor ein Lied singen wollen, welches ihrer Stimmlage nicht paßt, oft in der Quinte mitsingen hört, worin sich recht deutlich ausspricht, daß auch dem ungebildeten Ohr die Wiederholung in der Quinte als eine natürliche Wiederholung erscheint. Systematisch soll dies Mitsingen in der Quinte und Quarte in den früheren Zeiten des Mittelalters ausgebildet gewesen sein. Aber auch in der neueren Musik spielt die Wiederholung in der Quinte eine hervorragende Rolle nächst der Wiederholung in der Oktave. In den normalen Fugen wird bekanntlich das Thema zunächst in der Quinte wiederholt; in der Normalform der Instrumentalstücke, der der Sonate, wird das Thema im ersten Satz in die Quinte hinübergeführt, um im zweiten Teil im Grundton wiederzukehren. Diese Art unvollkommener Wiederholung des Eindruckes in der Quinte hat denn auch die Griechen veranlaßt, die Breite der Oktave noch einmal zu teilen in zwei äquivalente Abschnitte, nämlich in zwei Tetrachorde. Unsere Durtonleiter, nach diesem Prinzip abgeteilt, würde lauten:

$$\underbrace{c\ d\ e\ f}_{\text{I}}\ \overbrace{g\ a\ h\ c}^{\text{II}}\ \underbrace{d\ e\ f}_{\text{III}}$$

Die Tonfolge des zweiten Tetrachordes ist eine Wiederholung der Tonfolge des ersten, eine Quinte höher verlegt. Um in die Oktaventeilung zu passen, müssen die Tetrachorde abwechselnd getrennt und verbunden aneinander gereiht werden. Verbunden nennt man sie, wenn, wie zwischen II und III, der letzte Ton *c* des unteren auch der erste des oberen ist; wenn dagegen, wie in I und II, der letzte Ton des unteren vom ersten des oberen verschieden ist, so heißen sie getrennt. In dem zweiten Tetrachord *g*—*c* mußte jede aufsteigende Tonreihe schließlich zu *c* als Schlußton leiten, welches gleichzeitig auch die Oktave des Grundtones des ersten Tetrachordes ist. Dieses *c* ist nun die Quarte des *g*, des Grundtones des zweiten Tetrachordes. Sollte die Tonfolge in beiden Tetrachorden gleich gemacht werden, so mußte zunächst im unteren Tetrachord der dem *c* entsprechende Ton *f* hinzugefügt werden. Die Quarte *f* würde sich übrigens auch unabhängig von dieser Analogie der Tetrachorde ergeben haben in

derselben Weise wie die Quinte. Die Quinte ist der Klang, dessen zweiter Teilton gleich dem dritten des Grundtones ist; die Quarte der Klang, dessen dritter Teilton gleich dem zweiten der Oktave ist. So sind also zunächst die Grenztöne der beiden analogen Abteilungen der Oktave bestimmt, nämlich:

$$c—f,\ g—c,$$

aber die Ausfüllung der Zwischenräume bleibt vorderhand noch willkürlich, und ist auch von den Griechen selbst in verschiedenen Perioden verschieden, anders wieder von anderen alten Völkern vollzogen worden, während die Einteilung der Skala in Oktaven, die der Oktave in zwei analoge Tetrachorde fast ausnahmslos vorkommt.

Boëthius (de Musica Lib. I, cap. 20) berichtet nach Nikomachus, daß die älteste Stimmung der Lyra bis zu den Zeiten des Orpheus die erwähnte in unausgefüllten Tetrachorden gewesen sei:

$$c—f—g—c,$$

mit welcher freilich kaum eine Melodie zu bilden möglich gewesen wäre. Doch sind in diesen Tönen allerdings die Hauptstufen für die Tonfälle des gewöhnlichen Sprechens enthalten, so daß eine solche Lyra doch möglicherweise zur Begleitung der Deklamation hätte gebraucht werden können.

Die Verwandtschaft der Quinte und der durch ihre Umkehrung gegebenen Quarte mit dem Grundton ist so groß, daß sie sich in allen bekannten Musiksystemen aller Völker geltend macht. Dagegen sind betreffs der zwischen den Grenztönen des Tetrachordes einzuschaltenden Zwischentöne Schwankungen eingetreten. Das Intervall der Terz ist schon nicht mehr so deutlich durch leicht wahrnehmbare Obertöne begrenzt, daß es sich von vornherein dem Ohr ungeübter Musizierender bestimmt aufgedrängt hätte. Wir müssen bedenken, daß, selbst wenn der fünfte Partialton in dem Klang des gebrauchten Toninstrumentes noch enthalten war, er der Regel nach nicht bloß den an Tonstärke mächtigeren Grundton, sondern auch die stärkeren drei ersten Obertöne neben sich hatte und von diesen überdeckt wurde. In der Tat zeigt sich in der Geschichte der musikalischen Systeme ein langes Schwanken in bezug auf die Stimmung der Terzen; ein Schwanken, welches man noch jetzt fühlt, wenn man Terzen in rein melodischer Folge, ohne sie je zur Harmonie zu verbinden, zu stimmen sucht. Ich selbst muß gestehen, daß ich bei vereinzelten Intervallen dieser

Art nicht zu einem sicheren Resultat komme, wohl aber, wenn ich dieselben in einer wohlgebildeten Melodie mit deutlicher Tonalität höre. Dann erscheinen mir die natürlichen Terzen 4:5 im Vergleich mit den etwas größeren Terzen, welche die gleichschwebende Temperatur unserer modernen Instrumente, oder mit den noch größeren, welche die pythagoreische Stimmung nach reinen Quinten ergibt, als die ruhigeren, letztere als etwas angestrengt klingende Intervalle. Unsere modernen Musiker, welche an die Terzen der gleichschwebenden Temperatur gewöhnt sind, bevorzugen zum Teil letztere, wenn es sich nur um melodische Folge handelt; doch habe ich mich selbst überzeugt, daß Künstler ersten Ranges, wie Herr Joachim, auch in der Melodie die Terzen 4:5 brauchen. Für die Harmonie ist kein Zweifel, da entscheidet sich jeder für die letztere Terz. Im sechzehnten Abschnitt wird ein Instrument beschrieben werden, mit dessen Hilfe dergleichen Versuche anzustellen sind.

Unter solchen Umständen ist bei der Einteilung der Skala in den Anfängen der Musik und noch jetzt, wie es scheint, bei den weniger kultivierten Völkern ein anderes Prinzip mit zu Hilfe genommen worden, um die kleineren Intervalle zu teilen, welches aber später doch dem Prinzip der Tonverwandtschaft hat weichen müssen. Ich meine hier den Versuch, gleich große Zwischenstufen nach dem Gehör zu unterscheiden, so daß die wahrnehmbaren Unterschiede der Tonhöhe gleich groß ausfallen.

Für die Einteilung der Quarte hat sich allerdings ein solcher Versuch nie dauernd gegen das Gefühl der Verwandtschaft der Intervalle gehalten, wenigstens nicht in der künstlerisch ausgebildeten Musik. Aber für die Teilung kleinerer Intervalle werden wir dieses Teilungsprinzip als Aushilfe doch an manchen Stellen der weniger gebräuchlichen griechischen Tetrachordteilungen und in den Skalen der orientalischen Völker angewendet finden. Doch sind überall diese willkürlichen Teilungen, welche nicht auf Verwandtschaft der Klänge beruhen, in dem Maße geschwunden, als sich die Musik als Kunst zu reinerer Schönheit entwickelt hat.

Wir wollen zunächst sehen, was für eine Tonleiter wir erhalten, wenn wir der natürlichen Verwandtschaft der Klänge zueinander weiter nachgehen. Verwandt im ersten Grade nennen wir Klänge, welche zwei gleiche Partialtöne haben; verwandt im zweiten

Grade solche, welche mit demselben dritten Klang im ersten Grade verwandt sind. Je stärker die beiden übereinstimmenden Partialtöne sind im Verhältnis zu den übrigen Partialtönen zweier im ersten Grade verwandten Klänge, desto stärker ist die Verwandtschaft, desto leichter werden Sänger und Hörer das Gemeinsame beider Klänge zu fühlen wissen. Daraus folgt denn aber auch weiter, daß das Gefühl für die Verwandtschaft der Töne nach den Klangfarben verschieden sein muß, und ich glaube, daß man dies in der Tat behaupten kann, indem auf der Flöte und den weichen Orgelregistern, wo harmonische Zusammenklänge wegen der mangelnden Obertöne und der mangelhaft unterschiedenen Dissonanzen charakterlos klingen, etwas Ähnliches auch für die einfachen Melodien gilt. Dies rührt, wie ich meine, davon her, daß in den genannten Klangfarben die natürlichen Intervalle der Terzen und Sexten, vielleicht auch die der Quarten und Quinten, nicht unmittelbar in der Empfindung des Hörers ihre Rechtfertigung haben, sondern höchstens in der Erinnerung. Wenn der Hörer weiß, daß auf anderen Instrumenten und im Gesang die Terzen und Sexten als natürlich und direkt verwandte Klänge hervorgetreten sind, so läßt er sie als wohlbekannte Intervalle auch gelten, wenn sie von einer Flöte oder von weichen Orgelregistern vorgetragen werden. Doch kann ein in der Erinnerung bewahrter Eindruck nicht dieselbe Frische und Kraft haben, wie ein solcher unmittelbarer Empfindung.

Da die Stärke der Verwandtschaft von der Stärke der gleichen Obertöne abhängt, und die Obertöne von höherer Ordnungszahl schwächer zu sein pflegen, als die von niederer Ordnungszahl, so ist die Verwandtschaft zweier Klänge im allgemeinen desto schwächer, je größer die Ordnungszahlen der koinzidierenden Obertöne sind. Diese Ordnungszahlen geben aber auch, wie sich der Leser aus der Lehre von den konsonierenden Intervallen erinnern wird, das Verhältnis der Schwingungszahlen für die betreffenden beiden Noten an.

Ich lasse hier eine Tabelle folgen, welche in der oberen Horizontalreihe die Ordnungszahlen für die Partialtöne der Tonika *c* enthält, in der ersten Vertikalreihe dieselben für den betreffenden Ton der Leiter. Wo die betreffende Vertikal- und Horizontalreihe zusammentreffen, ist der entsprechende Ton der Leiter genannt, für welchen dieses Zusammentreffen stattfindet. Es sind aber nur diejenigen Noten aufgenommen, welche um weniger als eine Oktave von

der Tonika entfernt sind. Unter jede Tonstufe sind die beiden Ordnungszahlen der koinzidierenden Obertöne hingesetzt, um an diesen einen Maßstab für die Stärke der Verwandtschaft zu haben.

	Partialtöne der Tonika					
	1	2	3	4	5	6
1	*c* 1 : 1	*c'* 1 : 2				
2	*C* 2 : 1	*c* 2 · 2	*g* 2 : 3	*c'* 2 : 4		
3		*F* 3 : 2	*c* 3 : 3	*f* 3 · 4	*a* 3 · 5	*c'* 3 : 6
4		*C* 4 : 2	*G* 4 · 3	*c* 4 · 4	*e* 4 : 5	*g* 4 : 6
5			*Es* 5 : 3	*As* 5 : 4	*c* 5 : 5	*es* 5 : 6
6			*C* 6 : 3	*F* 6 : 4	*A* 6 : 5	*c* 6 : 6

In dieser systematischen Zusammenstellung finden wir in der oberhalb des Grundtones *c* gelegenen Oktave folgende Reihe von Klängen, welche der Tonika *c* im ersten Grade verwandt sind, nach der Reihe ihrer Verwandtschaft geordnet:

c	*c'*	*g*	*f*	*a*	*e*	*es*
1 : 1	1 : 2	2 : 3	3 : 4	3 · 5	4 : 5	5 : 6

in der absteigenden Oktave dagegen folgende Reihe:

c	*C*	*F*	*G*	*Es*	*As*	*A*
1 : 1	1 : 2	3 · 2	4 : 3	5 : 3	5 : 4	6 : 5

Den Grund, die Reihe abzubrechen, finden wir in der Enge der entstehenden Intervalle. Diese dürfen nicht so klein werden, daß sie schwierig zu treffen und zu unterscheiden wären. Welches Intervall wir als das engste in der Skala zulassen dürfen, ist eine Frage, die von verschiedenen Nationen nach ihren verschiedenen Geschmacksrichtungen, vielleicht auch nach der verschiedenen Feinheit ihres Ohres verschieden beantwortet ist.

Es scheint, daß in den ersten Entwickelungsstadien der Musik viele Völker engere Intervalle als den Ganzton zu benutzen sich scheuten, und deshalb Skalen bildeten, in denen Schritte von dem Intervall eines Tones mit solchen von anderthalb Tönen wechselten.

Nach den Beispielen, welche Herr Fétis[1]) gesammelt hat, findet sich eine solche Skala nicht nur bei den Chinesen, sondern auch bei den übrigen Stämmen der mongolischen Rasse, ferner bei den Malaien von Java und Sumatra, bei Anwohnern der Hudsonbai, den Papuas von Neuguinea, Bewohnern von Neukaledonien, den Fullahnegern. Auch die fünfsaitige Lyra (Kissar) der Bewohner von Nordafrika und Abessinien, welche sich schon in den Basreliefs der assyrischen Königspaläste als Instrument gefangener Männer dargestellt findet, hat nach Villoteau[2]) die Stimmung der fünfstufigen Skala:

$$g — a — h — d — e.$$

Spuren einer alten Skala dieser Art finden sich für die offenbar gleichnamige Kithara der Griechen. Wenigstens hat Terpander, der in der Entwickelung der altgriechischen Musik eine hervortretende Rolle gespielt und der vor ihm sechssaitigen Kithara eine siebente Saite hinzugefügt hat, eine aus einem Tetrachord und einem Trichord zusammengesetzte Skala gebraucht, die den Umfang einer Oktave hatte, und deren Stimmung folgende war:

$$e \smile f — g — a — h \smile — d' — e'\,^{3}),$$

worin der Ton c' fehlt, und das obere Tetrachord ohne einen Halbtonschritt bleibt, obgleich das untere einen solchen hat.

Auch der Umstand, daß Olympos, der das asiatische Flötenspiel in Griechenland einführte und dem griechischen Geschmack anbildete, die dorische Skala der Griechen zu einer fünfstufigen, der alten enharmonischen Skala

$$h \smile c — — e \smile f — — a$$

umformte, scheint darauf hinzudeuten, daß er aus Asien fünfstufige Skalen mitbrachte und nur die Anwendung des Halbtones der griechischen Skala entlehnte. Unter den kultivierteren Völkern sind es die Chinesen und die Gälen Schottlands und Irlands, welche die fünfstufige Skala ohne Halbtöne bis jetzt festgehalten haben, obgleich beide daneben die vollständige siebenstufige Leiter kennen gelernt haben.

[1]) Histoire générale de la Musique. Paris 1869, T. I.

[2]) Descriptions des Instruments de Musique des Orientaux; chapt. XIII in der Description de l'Égypte. État moderne.

[3]) Nikomachus läßt den Philolaus sagen (Edit. Meibomii, p. 17): „Von der Hypate (e) zur Media (a) war eine Quart, von der Media zur Nete (e') eine Quint, von der Nete zur Trite (h) eine Quart, von der Trite zur Hypate eine Quint." Es folgt daraus, daß nicht das h fehlte, sondern c.

Bei den Chinesen soll ein Prinz Tsay-yu diese letztere unter starkem Widerspruch der konservativen Musiker eingeführt haben; und auch die Teilung der Oktave in 12 Halbtöne, die Transpositionen der Tonleitern sind von diesem klugen und geschickten Volke gefunden worden, aber die Melodien, welche von Reisenden aufgeschrieben sind, gehören meist der fünfstufigen Skala an. Die Schotten und Iren haben durch die Kirchengesänge ebenfalls die diatonische siebenstufige Leiter kennen gelernt, und in der gegenwärtigen Form ihrer Volksmelodien finden wir auch wohl die fehlenden beiden Töne wenigstens flüchtig berührt, als Vorschläge oder Durchgangsnoten. Doch sind dies in vielen Fällen moderne Verbesserungen, wie sich durch Vergleichung mit älteren Formen der Melodie erweisen läßt, und in der Regel kann man die Noten, die der fünftonigen Skala fremd sind, fortlassen, ohne die Melodie wesentlich zu verändern. Dies gilt nicht bloß von alten Melodien, sondern auch von solchen, die nachweisbar erst in den beiden letzten Jahrhunderten von gelehrten und ungelehrten Musikern komponiert sind und Eingang in das Volk fanden. Es halten also die Gälen, ebensogut wie die Chinesen, trotz der Bekanntschaft mit dem modernen Tonsystem, ihre alte Skala fest[1]), und es ist nicht zu leugnen, daß die schottischen Melodien durch die Vermeidung der kleinen Halbtonschritte der diatonischen Skala etwas eigentümlich Klares und Bewegliches bekommen, was man freilich den chinesischen Melodien nicht nachrühmen kann. Die geringe Zahl der Töne innerhalb der Oktave wird dadurch ausgeglichen, daß ein großer Umfang der Stimme benutzt wird, sowohl bei den Gälen wie bei den Chinesen.

Die fünfstufige Skala läßt nun noch eine gewisse Mannigfaltigkeit ihrer Bildung zu. Nehmen wir den Ton *c* als Tonika, und fügen zu ihm die nächst verwandten Töne der aufsteigenden Oktave, bis wir einen Halbton treffen, so erhalten wir:

$$c — c' — g — f — a.$$

Das folgende *e* bildet mit *f* schon einen Halbton. In der absteigenden Oktave erhalten wir ebenso:

$$c — C — F — G — Es.$$

[1]) Chinesische Melodien in Ambroschs Geschichte der Musik 1, 30, 34, 35. Von schottischen eine reiche Sammlung mit Angaben der Quellen und der alten Formen in G. F. Grahams Songs of Scotland 3, Edinburgh 1859. Die hinzugesetzte moderne Klavierbegleitung paßt freilich oft schlecht genug zum Charakter der Melodien.

Die in diesen Skalen bleibenden großen Lücken, in der ersten zwischen *c* und *f*, in der zweiten zwischen *G* und *c*, werden durch die nächsten Verwandten zweiten Grades ausgefüllt. Da die Verwandten der Oktave immer nur dieselben Tonstufen wiedergeben, welche wir schon als direkte Verwandte der Tonika erhalten haben, so sind es die Verwandten der Oberquinte *g* und Unterquinte *F*, welche zunächst in Betracht kommen, und zwar die Oberquinte *d* der Oberquinte *g*, und die Unterquinte *B* der Unterquinte *F*. So erhalten wir folgende Skalen:

1. aufsteigend:

$$\begin{array}{ccccccccc} c & - & d & - & \smile f & - & g & - & a & - & \smile c' \\ 1 & & \frac{9}{8} & & \frac{4}{3} & & \frac{3}{2} & & \frac{5}{3} & & 2 \end{array}$$

2. absteigend:

$$\begin{array}{ccccccccc} C & - & \smile Es & - & F & - & G & - & \smile B & - & c \\ 1 & & \frac{6}{5} & & \frac{4}{3} & & \frac{3}{2} & & \frac{16}{9} & & 2 \end{array}$$

Es können aber auch beide gleichzeitig eingeführt werden statt der schwächer verwandten Töne ersten Grades, was dann die nur durch Quintenverwandtschaft erzeugte Reihe gäbe:

3. $$\begin{array}{ccccccccc} c & - & d & - & \smile f & - & g & - & \smile b & - & c' \\ 1 & & \frac{9}{8} & & \frac{4}{3} & & \frac{3}{2} & & \frac{16}{9} & & 2 \end{array}$$

Dann kommen aber auch etwas unregelmäßigere Bildungen dieser fünfstufigen Leitern vor, in denen statt des der Tonika *c* enger verwandten Tones *f* die etwas entfernter verwandte große Terz *e* eintritt, eine Umbildung, die sich, vielleicht unter dem Einfluß der modernen Bevorzugung der Durtonart, namentlich in sehr vielen schottischen Melodien eingestellt hat. Dies gibt die Leiter:

4. $$\begin{array}{ccccccccc} c & - & d & - & e & - & \smile g & - & a & - & \smile c' \\ 1 & & \frac{9}{8} & & \frac{5}{4} & & \frac{3}{2} & & \frac{5}{3} & & 2 \end{array}$$

Beispiele für eine ähnliche Vertauschung der Quinte *g* mit der kleinen Sexte *as* sind zweifelhaft; es gäbe dies folgende Leiter:

5. $$\begin{array}{ccccccccc} C & - & \smile Es & - & F & - & \smile As & - & B & - & c, \\ 1 & & \frac{6}{5} & & \frac{4}{3} & & \frac{8}{5} & & \frac{16}{9} & & 2 \end{array}$$

Die Leiter

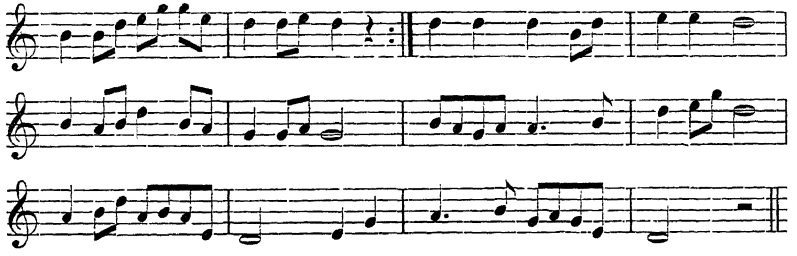
$$\begin{array}{ccccccccc} c & - & \smile es & - & f & - & g & - & a & - & \smile c \\ 1 & & \frac{6}{5} & & \frac{4}{3} & & \frac{3}{2} & & \frac{5}{3} & & 2 \end{array}$$

bei welcher nur Verwandte ersten Grades benutzt wären, aber von der Tonika aus nach beiden Seiten hin nur Schritte in großen Intervallen zu machen sind, habe ich nirgends gebraucht gefunden.

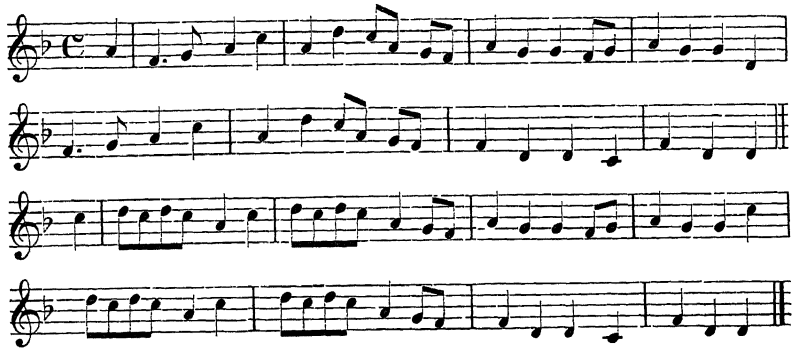
Die aufgeführten fünf Formen der fünfstufigen Leiter können alle so transponiert werden, daß man sie auf den schwarzen Obertasten des Klaviers spielen kann, ohne die Untertasten zu berühren. Bekanntlich schreibt man dies als eine einfache Regel vor, nach der man schottische Melodien komponieren könne. Dabei kann jedoch jede der fünf Obertasten als Tonika benutzt werden, nur das *B*, welches keine Quinte unter den Obertasten hat, bleibt von zweifelhafter Berechtigung als Tonika.

Ich lasse hier Beispiele dieser verschiedenen fünfstufigen Skalen folgen:

1. Zur ersten Tonleiter ohne Terz und Septime: chinesisch nach John Barrow:

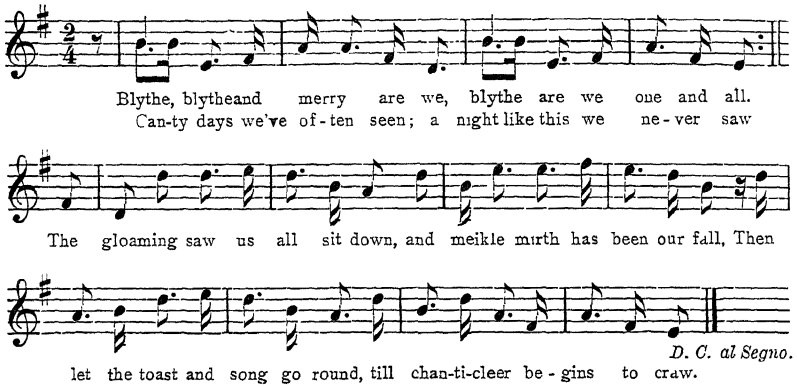


2. Zur zweiten Tonleiter ohne Sekunde und Sexte gehören die meisten schottischen Lieder, die den Charakter einer Molltonart haben; doch ist in den modernen Formen dieser Lieder meist der eine oder andere der fehlenden Töne flüchtig berührt. Hier folgt von der Melodie »*Cockle Shell's*« eine ältere Form[1]):

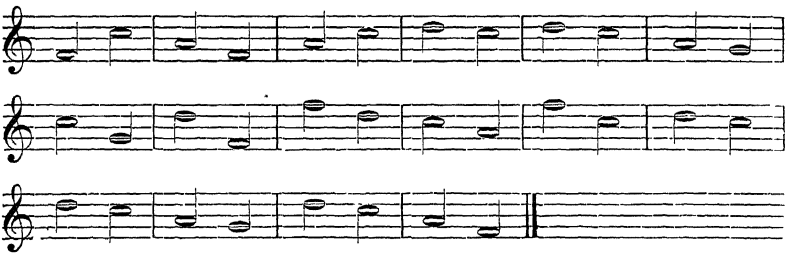


[1]) Playfords Dancing master, Edition 1721. Die erste Auflage davon erschien 1657. — Songs of Scotland 3, 170.

3. Zur dritten Tonleiter ohne Terz und Sexte. Gälisch, wahrscheinlich eine alte Dudelsackmelodie [1]):



4. Der vierten Tonleiter gehören die meisten schottischen Melodien an, welche den Charakter einer Durtonart an sich tragen; es fehlt die Quarte und Septime der Durtonleiter. Da schottische Melodien dieser Art in jeder Sammlung solcher sich dutzendweise vorfinden und allgemein bekannt sind, so gebe ich hier als Beispiel eine chinesische alte Tempelhymne nach Bitschurin [2]):

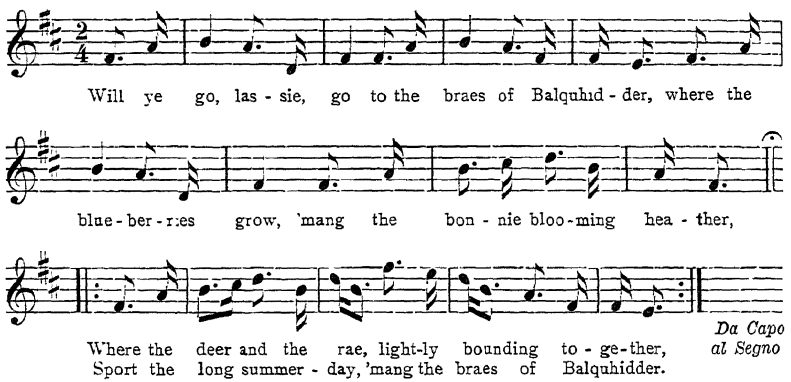


5. Melodien, welche der fünften Tonleiter ohne Sekunde und Quinte ganz rein angehörten, habe ich nicht gefunden; doch finden sich welche, in denen entweder nur die Quinte, oder beide Intervalle ganz flüchtig berührt werden. Im letzteren Falle tritt die kleine

[1]) Ein chinesisches Lied derselben Art bei Ambrosch, l. c. 1, 34; das zweite Stück. — Ein anderes mit einmaligem Anschlag der Sexte in Songs of Scotland 3, 10: „My Peggy is a young thing".

[2]) Ambrosch, l. c. 1, 30. — Dahin gehört auch das erste Stück von S. 35, nach Barrow und Amiot.

Sekunde ein, wodurch der Charakter der phrygischen Kirchentonart entsteht, z. B. in dem sehr schönen Liede »*Auld Robin*«. Ich gebe hier eines mit der Tonika *fis*, wo die Sekunde ganz fehlt, und die Quinte *cis* nur flüchtig zweimal berührt wird, so daß man sie ebensogut auch ganz weglassen könnte:



Man könnte in diesem Beispiel freilich auch sehr gut *h* als Tonika annehmen, und die Schlüsse auf der Dominante und Unterdominante nach alter Weise gebildet betrachten. Überhaupt ist in diesen fünfstufigen Melodien die Bestimmung der Tonika oft noch viel schwankender als in den siebenstufigen.

Die gewöhnlich gegebene Regel, daß in der gälisch-chinesischen Skala die Quarte und Septime ausgelassen seien, paßt also nur auf diejenige fünftonige Leiter, welche unserer Durskala entspricht, und welche allerdings unter den jetzt gebräuchlichen schottischen Melodien das numerische Übergewicht hat, wahrscheinlich veranlaßt durch die Rückwirkung des neueren Tonsystemes. Die hier angeführten Beispiele zeigen, daß jede mögliche Lage der Tonika in der fünftonigen Leiter vorkommt, wenn man diesen Leitern überhaupt den Besitz einer Tonika einräumt. In den schottischen Melodien geschehen die Auslassungen der beiden Töne sowohl der Durtonleiter als der Molltonleiter ohne Ausnahme so, daß die Halbtonschritte der Leiter in $1^1/_2$ Tonschritte verwandelt werden. Unter den chinesischen Melodien finde ich allerdings eine, in welcher Halbtonstufen stehen geblieben sind; diese schließt sich dem später zu besprechenden alten enharmonischen System der Griechen an und wird dort ihre Erklärung finden.

Wir gehen jetzt zur Konstruktion der siebenstufigen Leiter über. Deren erste Formen entwickelten sich unter dem Einfluß der Tetrachordeinteilungen der Griechen. Ihre altertümlichen Melodien hatten geringen Umfang und wenige Tonstufen, eine Eigentümlichkeit, die auch von späteren Schriftstellern, z. B. Plutarch, besonders betont wird, die übrigens auch bei den meisten anderen Völkern in den Anfangsstadien ihrer musikalischen Ausbildung sich findet. Die Skala bildete sich deshalb zuerst in engeren Grenzen als denen einer Oktave aus, nämlich innerhalb des Tetrachordes. Wenn man nun innerhalb eines solchen die nächsten Verwandten zu der begrenzenden Tonika (μέση) sucht, so fallen nur die Terzen in diesen Umfang hinein. Nehmen wir in dem Tetrachord *h — e* den letzteren Ton als Tonika, so ist der nächste Verwandte derselben innerhalb der Grenzen des Tetrachordes *c* als große Unterterz von *e*. Dies gibt:

1. Das alte enharmonische Tetrachord des Olympos:

$$\underset{\frac{3}{4}}{h} \smile \underset{\frac{4}{5}}{c} — — \underset{1}{e}$$

Daß die Stimmung $c:e = 4:5$ sein müsse, stellte Archytas gerade zuerst für das enharmonische Geschlecht fest. Der demnächst folgende verwandte Ton des *e* wäre die kleine Unterterz; setzen wir diese hinzu, so erhalten wir:

2. Das ältere chromatische Tetrachord der Griechen:

$$\underset{\frac{3}{4}}{h} \smile \underset{\frac{4}{5}}{c} \smile \underset{\frac{5}{6}}{cis} — \smile \underset{1}{e}$$

Die hier angegebene Stimmung der Intervalle entspricht den Angaben des Eratosthenes (im 3. Jahrh. v. Chr.). Das Intervall zwischen *c* und *cis* entspricht hier nur dem kleinen Verhältnis $\frac{25}{24}$, welches kleiner ist als ein Halbton $\frac{16}{15}$. Daneben steht das viel weitere Intervall *cis — e*, welches einer kleinen Terz entspricht. Eine gleichmäßigere Verteilung der Tonschritte erhielt man, wenn man vom unteren Ton des Tetrachordes die kleine Terz nach oben maß. So entsteht:

3. Das diatonische Tetrachord:

$$\underset{\frac{3}{4}}{h} — \underset{\frac{4}{5}}{c} — \underset{\frac{9}{10}}{d} — \underset{1}{e}$$

Es ist dies die Stimmung, welche Ptolemäus für das diatonische Tetrachord angibt. Hierbei ist aber zu bemerken, daß, wenn *e* als Tonika betrachtet wird, dieses *d* nur eine schwache Verwandtschaft

zweiten Grades durch Vermittelung des h mit der Tonika hat. Hatte man erst, wie schon früh geschah, zwei Tetrachorde verbunden:

$$h - - e - - a,$$

so erhielt man für das d eine engere Verwandtschaft zweiten Grades, wenn man es als Unterquinte zum a stimmte. Wenn $e = 1$, ist $a = \frac{4}{3}$, und seine Unterquinte ist $d = \frac{8}{9}$. Dies gibt das Tetrachord:

$$\underset{\frac{3}{4}}{h} \smile \underset{\frac{4}{5}}{c} - \underset{\frac{8}{9}}{d} - \underset{1}{e}$$

was der von Didymus (im 1. Jahrh. n. Chr.) angegebenen Stimmung entspricht.

Der älteren Theorie des Pythagoras gemäß, deren Kritik ich weiter unten geben werde, wären alle Intervalle der diatonischen Skala durch Quintenschritte erzeugt, daher ist die Stimmung folgende:

$$\underset{\frac{4}{3}}{h} \smile \underbrace{\underset{\frac{81}{64}}{c}}_{\frac{243}{256}} - \underbrace{\underset{\frac{9}{8}}{d}}_{\frac{9}{8}} - \underbrace{\underset{1}{e}}_{\frac{9}{8}}$$

Das so gewonnene Tetrachord ist das dorische der Griechen, welches als das normale betrachtet und allen Betrachtungen auch anderer Skalen zugrunde gelegt wurde. Es wurden demnach immer diejenigen Töne, welche die Halbtöne der Skala nach unten hin begrenzten, als die festen Grenztöne der Tetrachorde mindestens theoretisch betrachtet, während die mittleren Töne ihre Lage ändern konnten. Daß praktisch zuweilen auch die Stimmung der sogenannten feststehenden Töne ein wenig geändert wurde, erwähnt Plutarch. Dies kann seinen Sinn darin haben, daß in der lydischen, phrygischen usw. Tonart die Tonika nicht aus den sogenannten feststehenden Tönen der Tetrachorde genommen war. So werden wir z. B. später sehen, daß, wenn d die Tonika ist, das h der Skala in der natürlichen Stimmung einer solchen Leiter keine reine Quinte mit dem e bildet.

Übrigens können die Tetrachorde durch Einschaltung von Tönen, die bald mit dem oberen, bald mit dem unteren Grenzton bald eine große, bald eine kleine Terz bilden, noch anders ausgefüllt werden.

Zwei kleine Terzen geben das phrygische Tetrachord:

$$\underset{\frac{3}{4}}{d} - \underset{\frac{5}{6}}{e} \smile \underset{\frac{9}{10}}{f} - \underset{1}{g}$$

Wird vom unteren Grenzton eine große Terz nach oben, vom oberen eine kleine nach unten abgemessen, so erhalten wir das lydische Tetrachord:

$$\begin{array}{ccccc} c & - & d & - & e \smile f \\ \frac{3}{4} & & \frac{5}{6} & & \frac{15}{16} \quad 1 \end{array}$$

Zwei große Terzen würden eine Abart der chromatischen Leiter: $h \smile c - dis \smile e$ geben, welche aber nicht gebraucht zu sein scheint, oder wenigstens nicht von der chromatischen unterschieden wurde.

Es sind dies die normalen Teilungen des Tetrachordes gewesen; außerdem kamen aber auch andere Einteilungen vor, die von den Griechen selbst als irrationell (ἄλογα) bezeichnet werden, und von denen wir nicht sicher wissen, wie weit sich ihr praktischer Gebrauch ausgedehnt hat. Eines derselben, das gleich diatonische Geschlecht, braucht ein den natürlichen Konsonanzen mindestens sehr nahe stehendes Intervall 6:7, wie es zwischen der Quinte und der natürlichen kleinen Septime des Grundtones vorkommt und welches gelegentlich auch wohl in der neueren harmonischen Musik angewendet wird, wenn Sänger die kleine Septime eines Septimenakkordes frei einsetzen. Die Intervalle sind:

$$\overbrace{\underbrace{\frac{21}{20} \qquad \frac{10}{9}}_{6:7} \qquad \frac{8}{7}}^{3:4}$$

Durch den erniedrigten Lichanos ist auch die Parhypate abwärts gedrängt; doch entspricht das kleine Intervall $\frac{21}{20}$ immer noch sehr nahe dem Halbton der pythagoreischen Skala, welcher in kleinsten Zahlen $\frac{20}{19}$ geschrieben werden kann.

In dem gleich diatonischen Geschlecht des Ptolemäus, dessen Teilung war:

$$\overbrace{\underbrace{\frac{12}{11} \qquad \frac{11}{10}}_{5:6} \qquad \frac{10}{9}}^{3:4}$$

ist eine natürliche kleine Terz enthalten, diese aber in zwei möglichst gleiche Teile abgeteilt.

Eine ähnliche Folge von Tönen, aber in umgekehrter Ordnung, findet sich in der modernen arabischen Skala, wie sie von dem Syrer Michael Meshakah[1]) abgemessen wird. Hier wird die Oktave in

[1]) Journal of the American Oriental Society 1, 173, 1847.

24 Vierteltöne geteilt; das Tetrachord hat 10 derselben, und seine unterste Tonstufe hat 4 derselben, die beiden oberen je 3. Unter diesen Umständen bilden die beiden oberen zusammengenommen sehr nahe eine kleine Terz, die wie im gleich diatonischen System der Griechen in zwei gleich große Tonstufen geteilt ist, ohne Rücksicht auf irgend eine fühlbare Verwandtschaft des so entstehenden Zwischentones.

Je enger übrigens das Intervall ist, desto leichter und sicherer wird es in zwei Tonstufen von gleichem Unterschied der Höhe rein nach der Empfindung dieser Höhenunterschiede zu teilen sein. Namentlich ist dies möglich bei Tonstufen, die sich der Grenze des Unterscheidbaren nähern. Da gibt uns die Deutlichkeit des noch wahrnehmbaren Unterschiedes ein Maß für ihre Größe. In diesem Sinne ist wohl die Möglichkeit des späteren enharmonischen Geschlechtes der Griechen zu erklären, welches aber zur Zeit des Aristoxenus schon wieder aus dem Gebrauch gekommen war, und von späteren vielleicht nur als archaistische Merkwürdigkeit wieder hervorgesucht sein mag. In diesem Geschlecht wurde der halbe Ton des oben erwähnten alten enharmonischen Geschlechtes des Olympos noch einmal in zwei Vierteltöne geteilt, so daß ein dem chromatischen ähnliches Tetrachord entstand, nur mit noch engeren Intervallen der nahen Töne. Die Teilung eines solchen enharmonischen Tetrachordes war:

$$4:3 \qquad \frac{32}{31} \quad \frac{31}{30} \quad \frac{5}{4}$$

Wir können uns diesen Viertelton nur als einen Vorhalt in der melodischen Bewegung zum unteren Grenzton des Tetrachordes hin erklären. In dieser Weise kommt ein solches Intervall noch in der jetzigen orientalischen Musik vor. Ein ausgezeichneter Musiker, den ich bat, bei einer Reise nach Kairo darauf zu achten, schrieb mir darüber: „Ich habe diese Nacht dem Gesang auf den Minarets aufmerksam zugehört, um ein Urteil über die Vierteltöne zu erhalten, welche ich nicht möglich glaubte, da ich dachte, die Araber sängen falsch. Heute jedoch, als ich bei den Derwischen war, gelangte ich zur Gewißheit, daß es deren gibt, und zwar aus folgenden Gründen: Mehrere Stellen der Art von Litaneien endigten mit einem Ton, der zuerst der Viertelton war und mit dem reinen Ton endigte. Da

die Stelle sich oft wiederholte, hatte ich Gelegenheit, jedesmal dasselbe zu beobachten, und immer war die Intonation dieselbe.“ Übrigens findet man doch auch bei den griechischen Schriftstellern über Musik erwähnt, daß die Vierteltöne der Enharmonik schwer zu unterscheiden seien.

Die neueren Interpreten der griechischen Musiklehre haben meistens die Meinung aufgestellt, daß die genannten Unterschiede in der Stimmung, welche die Griechen Tonfarben (χρόαι) nannten, nur theoretische Spekulationen seien, welche nie zur Anwendung gekommen wären[1]). Sie meinten, diese Unterschiede seien so klein, daß eine ganz unglaublich verfeinerte Ausbildung des Gehörs nötig sei, um ihre ästhetische Wirkung aufzufassen. Demgegenüber muß ich nun behaupten, daß diese Meinung der modernen Theoretiker nur deshalb hat aufgestellt werden können, weil niemand unter ihnen versucht hat, jene verschiedenen Tongeschlechter praktisch nachzubilden und mit dem Ohr zu vergleichen. Auf einem weiter unten zu beschreibenden Harmonium kann ich die natürliche Stimmung mit der pythagoreischen vergleichen und das diatonische Geschlecht bald in der Weise des Didymus, bald in der des Ptolemäus ausführen, oder auch noch andere Abweichungen herstellen. Es ist gar nicht schwer, den Unterschied eines Komma $\frac{81}{80}$ in der Stimmung der verschiedenen Tonstufen zu erkennen, wenn man bekannte Melodien in verschiedenen „Tonfarben“ ausführt, und jeder Musiker, dem ich den Versuch vorgemacht habe, hat sogleich den Unterschied gehört. Melodische Gänge mit pythagoreischen Terzen klingen angestrengt und unruhig, solche mit natürlichen Terzen dagegen wohllautend, ruhig und weich, trotzdem unsere gewöhnliche gleichschwebende Stimmung Terzen hat, welche den pythagoreischen näher kommen als den natürlichen, und jene uns deshalb gewohnter sind als letztere. Und was ferner die Feinheit sinnlicher Beobachtung in künstlerischen Dingen betrifft, so dürfen wir neueren darin wohl überhaupt die Griechen als unübertroffene Muster betrachten. Bei dem hier vor-

[1]) Auch Bellermann ist dieser Meinung (Tonleitern der Griechen, S. 27). Stellen aus den griechischen Schriftstellern, welche den wirklichen praktischen Gebrauch erweisen, hat Westphal in seinen Fragmenten der griechischen Rhythmiker, S. 209 zusammengestellt. Nach Plutarch, de Musica, S. 38 und 39, haben die späteren Griechen sogar eine Vorliebe für die nachgelassenen Intervalle gehabt.

liegenden Gegenstande aber hatten sie ganz besondere Veranlassung und Gelegenheit, ihr Ohr feiner auszubilden, als wir das unsere. Wir sind von Jugend auf daran gewöhnt, uns mit den Ungenauigkeiten der modernen gleichschwebenden Stimmung abzufinden, und die ganze frühere Mannigfaltigkeit der Tongeschlechter von verschiedenem Ausdruck hat sich reduziert auf den ziemlich leicht vernehmbaren Unterschied von Dur und Moll. Die verschiedenen Abstufungen des Ausdruckes aber, welche wir durch Harmonie und Modulation erreichen, mußten die Griechen und andere Völker, die nur homophone Musik besitzen, durch eine feinere und mannigfaltigere Abstufung der Tongeschlechter zu erreichen suchen. Was wunders daher, wenn sich auch ihr Ohr für diese Art von Unterschieden viel feiner ausbildete, als das unserige dafür ausgebildet ist.

Die griechische Tonleiter wurde übrigens schon früh bis zur Oktave ausgedehnt; Pythagoras soll es gewesen sein, der die acht Stufen der diatonischen Leiter innerhalb der Oktave vollständig hinstellte. Zuerst hatte man je zwei Tetrachorde so verbunden, daß ihnen ein Ton, die μέση, gemeinsam war:

$$\underbrace{e \smile f - g - a}\ \underbrace{\smile b - c - d}$$

wodurch eine siebenstufige Leiter entstand. Dann war diese Leiter umgestimmt worden in die Form:

$$\underbrace{e \smile f - g - a}\ -\ \underbrace{h \smile - d - e}$$

so daß sie aus einem Tetrachord und einem Trichord bestand, wovon oben schon geredet ist, endlich war von Lichaon aus Samos (nach Boethius) oder von Pythagoras (nach Nikomachus) das Trichord zum Tetrachord ergänzt worden, und dadurch die achtstufige Leiter aus zwei getrennten Tetrachorden hergestellt worden.

Die gewonnene diatonische Leiter konnte durch Hinzufügung der höheren und tieferen Oktaven ihrer Tonstufen beliebig weit fortgesetzt werden, und gab dann eine regelmäßig wechselnde Reihe von ganzen Tonstufen und Halbtönen. Für jedes einzelne Musikstück wurde nun aber nur ein Teil dieser unbegrenzten diatonischen Leiter angewendet, und nach der Verschiedenheit dieser Teile unterschied man verschiedene Tonsysteme.

Solche begrenzte Tonleitern können nun in sehr verschiedenem Sinne gegeben werden. Der erste praktische Zweck, welcher sich

aufdrängen muß, sobald ein Instrument mit einer begrenzten Anzahl von Saiten, wie die griechische Lyra, zur Ausführung eines Musikstückes gebraucht werden soll, ist offenbar der, daß alle Töne, die in dem Musikstück vorkommen, auch in den Saiten der Lyra gegeben sein müssen. Dadurch ist also für die Stimmung des Instrumentes eine gewisse Reihe von Tönen vorgeschrieben, welche auf den Saiten gestimmt werden müssen. Wenn uns nun eine solche Reihe von Tönen, nach denen die Lyra gestimmt wurde, gegeben ist als Tonleiter, so folgt daraus in der Regel nicht das geringste über die Frage, ob eine Tonika in einer solchen Leiter zu unterscheiden ist und welche. Man wird ziemlich viele Melodien finden können, deren tiefster Ton die Tonika ist, andere, in denen noch eine Tonstufe unter der Tonika berührt wird, andere, in denen die Quinte oder Quarte der nächst tieferen Oktave den tiefsten Ton bildet. Der Unterschied zwischen den authentischen und plagalischen Tonleitern des Mittelalters ist von dieser Art. In den authentischen war der tiefste Ton der Leiter die Tonika, in den plagalischen deren Quinte, z. B.:

Erste authentische Kirchentonart, Tonika *d*:

$$\underbrace{d - e - f - g - a}\ \overbrace{- h - c - d}.$$

Vierte plagalische, Tonika *g*:

$$\overbrace{d - e - f - g}\ \underbrace{- a - h - c - d}.$$

Man dachte sie aus einer Quinte und einer Quarte zusammengesetzt, wie die Klammern zeigen; bei den authentischen lag die Quinte unten, bei den plagalischen oben. Wenn uns nun weiter nichts angegeben wird als eine solche Leiter, welche den zufälligen Umfang einer Reihe von Melodien bezeichnet, so können wir daraus über die Tonart wenig entnehmen. Wir können solche Tonreihen, die nur dem Umfang gewisser Melodien sich anpassen, akzidentelle Tonleitern nennen. Zu ihnen gehören unter anderen die plagalischen des Mittelalters. Dagegen nennen wir solche, welche in moderner Weise unten und oben durch die Tonika begrenzt sind, essentielle Tonleitern. Nun ist es klar, daß das praktische Bedürfnis zuerst nur auf akzidentelle Tonleitern führt. Es war unumgänglich nötig, eine Lyra, mit der man den Gesang unisono be-

gleiten wollte, so zu stimmen, daß die nötigen Töne da waren. Ein unmittelbares praktisches Interesse, die Tonika eines einstimmigen Gesanges als solche zu bezeichnen, sich überhaupt nur klar zu machen, daß eine solche da sei, wie ihr Verhältnis zu den übrigen Tönen sei, lag wohl nicht vor. In der modernen Musik, wo der Bau der Harmonie wesentlich von der Tonika abhängt, verhält es sich damit ganz anders. Auf die Unterscheidung der Tonika konnten erst theoretische Betrachtungen des Baues der Melodie leiten. Daß Aristoteles als Ästhetiker einige darauf deutende Notizen hinterlassen hat, die Autoren dagegen, welche eigentlich über Musik geschrieben haben, nichts davon sagen, ist schon im vorigen Abschnitt erwähnt worden.

Während der griechischen Blütezeit wendete man zur Begleitung des Gesanges der Regel nach achtsaitige Lyren an, deren Stimmung dem Umfang einer aus der diatonischen Leiter entnommenen Oktave entsprach. Diese waren folgende:

1. Lydisch:
   c — d — e — f — g — a — h — c.
2. Phrygisch:
   d — e — f — g — a — h — c — d.
3. Dorisch:
   e — f — g — a — h — c — d — e.
4. Hypolydisch:
   f — g — a — h — c — d — e — f.
5. Hypophrygisch (Ionisch):
   g — a — h — c — d — e — f — g.
6. Hypodorisch (Äolisch oder Lokrisch):
   a — h — c — d — e — f — g — a.
7. Mixolydisch:
   h — c — d — e — f — g — a — h — (c).

Es konnte also jeder Ton der diatonischen Leiter als Anfangs- und Endpunkt eines solchen Tongeschlechtes gebraucht werden. Die lydische und hypolydische Tonreihe enthalten lydische Tetrachorde,

die phrygische und hypophrygische enthalten phrygische, die dorische und hypodorische dorische. In der mixolydischen scheint man zwei lydische Tetrachorde angenommen zu haben, von denen aber das eine zerteilt war, wie es durch die Klammern oben angedeutet ist.

Man hat bisher die genannten Tonleitern (Tropen) der griechischen Blütezeit als essentielle angesehen, d. h. vorausgesetzt, daß ihr tiefster Ton (Hypate) die Tonika gewesen sei. Eine bestimmte Begründung dieser Annahme fehlt aber, soviel ich sehe. Was Aristoteles darüber sagt, läßt, wie wir gesehen haben, den Mittelton (die Mese) hauptsächlich als Tonika erscheinen, während allerdings andere Attribute unserer Tonika auf die Hypate fallen [1]). Wie das nun aber auch gewesen sein mag, mag nun Mese oder Hypate als Tonika betrachtet werden, mögen wir die Tonleitern alle als authentische oder alle als plagalische betrachten, so folgt doch mit großer Wahrscheinlichkeit, daß schon die Griechen, bei denen wir die diatonische Leiter zuerst vollständig vorfinden, verschiedene, wahrscheinlich alle Töne dieser Leiter als Tonika zu benutzen sich erlaubten, ebenso, wie wir gesehen haben, daß bei den Chinesen und

[1]) R. Westphal hat in seiner Geschichte der alten und mittelalterlichen Musik, Breslau 1864, die genannten Stellen des Aristoteles benutzt, um eine Hypothese über die Tonika und die Schlußart der obigen Leitern aufzustellen. Er wendet die Sätze des Aristoteles aber nur auf die dorische, phrygische, lydische, mixolydische und lokrische Skala, nicht auf die zu jener Zeit ebenfalls schon bekannte äolische und ionische Skala an, für deren Ausschließung hierbei kein Grund ersichtlich ist. In jenen vier erstgenannten nimmt er die Mese als Tonika, die Hypate als Schlußton an. Bei den mit der Vorsatzsilbe „Hypo" bezeichneten Leitern sei dagegen die Hypate Tonika und Schlußton zugleich gewesen, bei den mit dem Wort „Syntono" verbundenen Namen dagegen sei die Hypate Schlußton und Terz der Tonika, ebenso vielleicht bei der einmal genannten böotischen Tonart. Daraus folgt denn, daß die *A*-Molltonleiter vorkommt als Dorisch mit dem Schluß in *e*, als Hypodorisch mit dem Schluß in *a*, als Böotisch mit dem Schluß in *c*; daß ferner das Mixolydische ein *E*-Moll mit kleiner Sekunde und dem Schluß in *h* sei, das Lokrische ein *D*-Moll mit großer Sexte und dem Schluß in *a*, das Phrygische, Hypophrygische oder Iastische und das Syntonoiastische ein *G*-Dur mit kleiner Septime, von denen das erste in *d*, das zweite in *g*, das dritte in *h* schloß. Endlich soll das Lydische, Hypolydische und Syntonolydische ein *F*-Dur mit übermäßiger Quarte und den Schlußtönen bzw. *c*, *f* oder *a* gewesen sein, die normale Durtonart aber soll nach Westphal durchaus gefehlt haben. Deutet man das Ionische nach den Worten des Aristoteles, so würde dieses aber ein richtiges Dur ergeben. Die Tonika *F* mit *H* als Quarte erscheint unserem Gefühl als ganz unmöglich.

Gälen jede Stufe der fünfstufigen Leiter als Tonika auftreten konnte. Dieselben Leitern finden wir, wahrscheinlich unmittelbar aus antiker Überlieferung entnommen, in dem altchristlichen Kirchengesang wieder.

Es bildeten sich also im homophonen Gesang, wenn wir absehen von den chromatischen und enharmonischen Leitern und den ganz willkürlich erscheinenden Leitern der Asiaten, welche alle zu weiterer Entwickelung sich unfähig gezeigt haben, die sieben diatonischen Tonleitern aus, welche untereinander Unterschiede des Tongeschlechtes von derselben Art zeigen, wie unsere Dur- und Molltonleitern. Diese Unterschiede treten deutlicher heraus, wenn wir alle mit derselben Tonika *c* beginnen lassen:

	Bezeichnung nach Glarean	Neu vorgeschlagen
Lydisch: *c — d — e — f — g — a — h — c*	Ionisch	Durgeschlecht
Ionisch: *c — d — e — f — g — a — b — c*	Mixolydisch	Quartengeschlecht
Phrygisch: *c — d — es — f — g — a — b — c*	Dorisch	Septimengeschlecht
Äolisch: *c — d — es — f — g — as — b — c*	Äolisch	Terzen- oder Mollgeschlecht
Dorisch: *c — des — es — f — g — as — b — c*	Phrygisch	Sextengeschlecht
Mixolydisch: *c — des — es — f — ges — as — b — c* .		Sekundengeschlecht
Syntonolydisch: *c — d — e — fis — g — a — h — c* .	Lydisch	Quintengeschlecht

Ich habe zur Orientierung die von Glarean für die Kirchentonarten gegebenen Namen hinzugefügt, deren Erteilung zwar auf einer Verwechselung der Tongeschlechter mit den späteren transponierten Molltonleitern der Griechen beruht, die aber den Musikern geläufiger sind, als die richtigen griechischen Namen. Übrigens werde ich Glareans Namen nicht brauchen, ohne ausdrücklich hinzuzusetzen, daß sie sich auf eine Kirchentonart beziehen; es wäre überhaupt besser, wenn man sie vergessen möchte. Die alte von Ambrosius eingeführte Bezeichnung durch Ziffern war viel zweck-

mäßiger; da diese Ziffern aber auch wieder geändert sind, und nicht für alle Tonarten ausreichen, so habe ich mir erlaubt, selbst neue Bezeichnungen vorzuschlagen in der obigen Tabelle, die dem Leser die Mühe ersparen, die Systeme griechischer Namen auswendig zu lernen, von denen die des Glarean gewiß falsch, und die anderen vielleicht auch nicht richtig angewendet sind. Nach der vorgeschlagenen neuen Bezeichnung würde der Ausdruck „Quartengeschlecht von *C*“ bedeuten eine Tonart, deren Tonika *C* ist, welche aber dieselbe Vorzeichnung hat, wie die auf der Quarte von *C*, nämlich *F*, errichtete Durtonleiter. Dabei ist zu bemerken, daß in diesen Namen unter den Septimen, Terzen, Sexten und Sekunden immer die kleinen Intervalle dieses Namens zu verstehen sind; wollten wir die großen wählen, so würde die Tonika in deren Leiter gar nicht vorkommen. Also: „Terzengeschlecht von *C*“ ist die Leiter mit der Tonika *C*, welche die Vorzeichnung von *Es*-Dur hat, da *Es* die kleine Terz von *C* ist; das ist also *C*-Moll, wie es wenigstens in der absteigenden Leiter ausgeführt wird. Ich hoffe, der Leser wird bei dieser Bezeichnung immer leicht übersehen können, was gemeint ist.

Dies war das System der griechischen Tonarten während der Blütezeit griechischer Kunst bis zur Zeit der mazedonischen Weltherrschaft hin. Die Gesangsmelodien waren in alter Zeit auf ein Tetrachord beschränkt gewesen, wie noch jetzt manche Melodien der römischen Liturgie; sie waren später bis zum Umfang einer Oktave gewachsen. Für den Gesang brauchte man deshalb auch nicht viel längere Tonleitern zu haben, man verschmähte es, die angestrengten hohen und klanglosen tiefen Töne der menschlichen Stimme zu brauchen; noch die neugriechischen Lieder, von denen Weitzmann[1]) eine Anzahl gesammelt hat, haben einen auffallend kleinen Tonumfang. Wenn schon Phrynis (Sieger in den Panathenäen 457 v. Chr.) die Kithara mit neun Saiten versah, so war der wesentlichste Vorteil dieser Einrichtung wohl der, daß er aus einem Tongeschlecht in ein anderes übergehen konnte.

Die spätere griechische Tonleiter, wie sie bei Euklides im dritten Jahrhundert zuerst vorkommt, umfaßt zwei Oktaven. Ihre Einrichtung ist folgende:

[1]) Geschichte der griechischen Musik. Berlin 1855.

A	Zugesetzter Ton,	*Proslambanomenos.*
H *c* *d* *e*	Tiefstes Tetrachord,	*Tetrachordon hypaton.*
f *g* *a*	Mittleres Tetrachord,	*Tetrachordon mesōn.*

h *c'* *d'* *e'*	Getrenntes Tetrachord, *T. diezeugmenōn.*	
a *b* *c'* *d'*	Verbundenes Tetrachord, *T. synemmenōn.*	
f' *g'* *a'*	Überschüssiges Tetrachord, *T. hyperbolaiōn.*	

Wir haben hier also einmal die hypodorische Skala durch zwei Oktaven, dann aber noch ein daneben angefügtes Tetrachord, welches neben dem *h* der ersten Skala auch noch den Ton *b* einführt, wodurch nach modernem Ausdruck Modulationen aus der Hauptleiter nach der Tonart der Subdominante möglich wurden [1]).

Diese Skala, der Hauptsache nach eine Molltonleiter, wurde transponiert, und man erhielt dadurch eine neue Reihe von Tonleitern, welche den verschiedenen Molltonleitern (absteigend gespielt) der modernen Musik entsprachen, auf welche man aber wiederum die alten Namen der Tongeschlechter übertrug, indem man ursprünglich jeder Molltonart den Namen gab, der demjenigen Tongeschlecht zukam, welches von dem zwischen den Grenztönen der hypodorischen Leiter liegenden Abschnitt der Molltonleiter gebildet wurde. Nach der Notenbezeichnung der Griechen müssen wir diese Töne *f — f* schreiben. Sie lagen aber wahrscheinlich dem Klang nach eine Terz tiefer. Also z. B. *D*-Moll hieß lydisch, weil in der *D*-Molleiter

d — e — | f — g — a — b — c — d — e — f | — g — a — b — c — d

der zwischen den Tönen *f* und *f* liegende Abschnitt der Leiter dem

[1]) Seltsamerweise hat sich diese Art von Tonleiter erhalten in der im Zillertal in Tirol gebrauchten Holzharmonika. Eine solche hat zwei Reihen von Stäbchen; die eine Reihe ist eine regelmäßige diatonische Leiter mit dem Tetrachordon diezeugmenōn; die andere etwas tiefer liegende hat in ihrer oberen Hälfte dafür das Tetrachordon synemmenōn.

lydischen Tongeschlecht angehörte. So veränderten die alten Namen der Tongeschlechter ihre Bedeutung in die von Tonarten. Die Übersicht dieser Namen ist folgende:

1. Hypodorisch	*F*-Moll
2. Hypoionisch	*Fis*-Moll
(Tieferes Hypophrygisch)	
3. Hypophrygisch	*G*-Moll
4. Hypäolisch	*Gis*-Moll
(Tieferes Hypolydisch)	
5. Hypolydisch	*A*-Moll
6. Dorisch	*B*-Moll
7. Ionisch	*H*-Moll
(Tieferes Phrygisch)	
8. Phrygisch	*C*-Moll
9. Äolisch	*Cis*-Moll
(Tieferes Lydisch)	
10. Lydisch	*D*-Moll
11. Hyperdorisch	*Es*-Moll
(Mixolydisch)	
12. Hyperionisch	*E*-Moll
(Höheres Mixolydisch)	
13. Hyperphrygisch . . . (Hypermixolydisch)	Spät. Zusatz: *f*-Moll
14. Hyperäolisch	Spät. Zusatz: *fis*-Moll
15. Hyperlydisch	Spät. Zusatz: *g*-Moll

Innerhalb jeder dieser Tonleitern konnte man jedes der vorher besprochenen Tongeschlechter bilden, indem man den entsprechenden Teil der Leiter benutzte. Außerdem erlaubte diese Leiter in das Tetrachordon Synemmenōn hineinzugehen, und damit in die Tonart der Subdominante hinüber zu modulieren.

Bei den diesen Leitern zugrunde liegenden Transpositionsversuchen erkannte man, daß man annähernd die Oktave aus 12 Halbtönen zusammengesetzt denken könne. Schon Aristoxenus wußte, daß man im Quintenzirkel fortschreitend bei der zwölften Quinte wieder auf einen Ton komme, der (wenigstens nahehin) eine höhere Oktave des Ausgangstones sei. Also in der Reihe

f — c — g — d — a — e — h — fis — cis — gis — dis — ais — eis

indentifizierte er *eis* mit *f*, und damit war die Reihe der durch den Quintenzirkel zu bildenden Töne abgeschlossen. Die Mathematiker widersprachen zwar, und sie hatten recht, insofern bei ganz reinen Quinten das *eis* ein wenig höher als *f* ist. Für die praktische Ausführung war aber dieser Fehler ganz unerheblich, und konnte in der homophonen Musik namentlich mit vollem Recht vernachlässigt werden [1]).

[1]) Für die Beurteilung der griechischen Systeme ist die Tatsache nicht unwichtig, daß in den thebanischen Königsgräbern der Ägypter eine Flöte gefunden ist (jetzt im Museum zu Florenz Nr. 2688), die nach der Untersuchung des Herrn Fétis eine fast vollständige Halbtonskala durch anderthalb Oktaven gibt. Nämlich:

Reihe der Grundtöne	*a, b, h, c', cis', d'*
Erste Obertöne	*a', b', h', c'', cis'', d'',*
Zweite Obertöne	*e'', f'', fis'', g'', gis'', a''*
Dritte Obertöne	*a'', b'', h'', c''', cis''', d'''.*

Damit war der Entwickelungsgang des griechischen Tonsystemes abgeschlossen. So vollständig aber auch unsere Kenntnisse über die äußerlichen Formen sind, so wenig wissen wir über das Wesen der Sache, weil die Beispiele aufbewahrter Melodien zu gering an Zahl und zu zweifelhaft in ihrem Ursprung sind.

Wie es nun aber auch mit der Tonalität der griechischen Tonleitern gewesen sein mag, und wieviel Fragen über sie auch noch ungelöst bleiben mögen, für die Theorie der allgemeinen historischen Entwickelung der Tongeschlechter erfahren wir, was wir brauchen, aus den Gesetzen der ältesten christlichen Kirchenmusik, deren erste Anfänge sich an die untergehende antike Kunstbildung noch anschließen. Im vierten Jahrhundert unserer Zeitrechnung setzte der Bischof Ambrosius von Mailand vier Tonleitern für den kirchlichen Gesang fest, welche in der unveränderten diatonischen Leiter waren:

Erste Tonart: *d — e — f — g — a — h — c — d*, Septimengeschlecht.
Zweite Tonart: *e — f — g — a — h — c — d — e*, Sextengeschlecht.
Dritte Tonart: *f — g — a — h — c — d — e — f*, Quintengeschlecht (unmelodisch).
Vierte Tonart: *g — a — h — c — d — e — f — g*, Quartengeschlecht.

Nun war aber der Ton *h*, wie in den späteren griechischen Leitern, veränderlich geblieben, statt seiner konnte *b* eintreten; dann gab es folgende Tonarten:

Erste: *d — e — f — g — a — b — c — d*, Terzengeschlecht (Moll).
Zweite: *e — f — g — a — b — c — d — e*, Sekundengeschlecht (unmelodisch).
Dritte: *f — g — a — b — c — d — e — f*, Dur.
Vierte: *g — a — b — c — d — e — f — g*, Septimengeschlecht.

Darüber, daß diese ambrosianischen Tonleitern als essentielle zu betrachten sind, ist kein Zweifel, denn die alte Regel ist, daß

Abbildungen solcher Flöten finden sich auf den allerältesten Denkmälern der Ägypter; sie sind sehr lang, die Löcher alle nahe dem einen Ende, und sie müssen deshalb mit weit ausgestrecktem Arm gegriffen werden; dadurch entsteht eine charakteristische Haltung der Spieler dieses Instrumentes. Schwerlich war diese alte Halbtonskala den Griechen unbekannt geblieben. Daß sie sie erst nach der Zeit Alexanders in ihre Theorie einführten, läßt erkennen, wie bestimmt sie die diatonische Skala bevorzugten.

Melodien in der ersten Leiter in *d* schließen müssen, die der zweiten in *e*, der dritten in *f*, der vierten in *g*; dadurch ist der Anfangston jeder dieser Leitern als Tonika charakterisiert. Wir dürfen diese von Ambrosius getroffene Anordnung wohl als eine praktische Vereinfachung der alten, mit einer inkonsequenten Nomenklatur überladenen Musiklehre für seine Chorsänger betrachten, und zurückschließen, daß wir recht hatten zu vermuten, daß die ähnlich aussehenden griechischen Tonleitern aus der griechischen Blütezeit wirklich als essentiell verschiedene Tonleitern gebraucht werden konnten.

Papst Gregor der Große fügte zwischen die ambrosianischen Leitern noch ebensoviel akzidentelle, die sogenannten plagalischen, ein, welche von der Quinte der Tonika zur Quinte liefen. Die ambrosianischen hießen im Gegensatz zu diesen die authentischen. Die Existenz dieser plagalischen Kirchentöne half die Verwirrung vermehren, welche gegen das Ende des Mittelalters über die Kirchentöne ausbrach, als die Komponisten die alten Regeln über die Lage des Schlußtones zu vernachlässigen anfingen, und diese Verwirrung diente dazu, eine freiere Entwickelung des Tonsystemes zu begünstigen. Darin zeigt sich übrigens auch, wie schon im vorigen Abschnitt bemerkt wurde, daß das Gefühl für die durchgängige Herrschaft der Tonika auch im Mittelalter noch nicht sehr ausgebildet war, während den griechischen Schriftstellern gegenüber doch wenigstens schon der Fortschritt gemacht war, daß man das Gesetz des Schlusses in der Tonika als Regel anerkannte, wenn auch nicht immer befolgte.

Glareanus suchte 1547 in seinem Dodekachordon die Lehre von den Tonarten wieder in das Reine zu bringen. Er wies durch Untersuchung der musikalischen Kompositionen seiner Zeitgenossen nach, daß nicht 4, sondern 6 authentische Tonarten zu unterscheiden seien, die er mit den oben dazu angegebenen griechischen Namen verzierte. Dazu nahm er 6 plagalische und unterschied im ganzen also 12 Tonarten, woher der Name seines Buches kommt. Also auch noch im 16. Jahrhundert wurden essentielle und akzidentelle Tonleitern in einer Reihe fortgezählt. Unter des Glareanus Tonleitern ist noch eine unmelodische, nämlich für das Quintengeschlecht, welches er die lydische Tonart nannte. Für dieses mangeln die Beispiele, wie auch Winterfeld bei einer sorgfältigen Untersuchung

mittelalterlicher Kompositionen fand [1]), wodurch das Urteil des Plato über das Mixolydische und Hypolydische bestätigt zu werden scheint.

Demgemäß bleiben übrig als melodische Tongeschlechter, welche für den homophonen und polyphonen Gesang im engeren Sinn brauchbar sind, folgende fünf:

	Nach unserer Bezeichnung	Griechisch	Nach Glarean	Leiter
1.	Dur	Lydisch	Ionisch	$C-c$
2.	Quartengeschlecht	Ionisch	Mixolydisch	$G-g$
3.	Septimengeschlecht	Phrygisch	Dorisch	$D-d$
4.	Terzengeschlecht	Äolisch	Äolisch	$A-a$
5.	Sextengeschlecht	Dorisch	Phrygisch	$E-e$

Die rationelle Konstruktion der bis zur Oktave oder über die Oktave hinaus fortgesetzten Tonleitern ergibt sich aus dem von uns oben hingestellten Prinzip der Verwandtschaft der Töne. Die Grenze, wie weit wir in dieser Reihe der Verwandten ersten Grades fortzugehen haben, wird dadurch bestimmt, daß zu enge Intervalle, deren Unterscheidung unsicher würde, zu vermeiden sind. Die dann noch bestehenden größeren Lücken werden durch die nächsten Verwandten zweiten Grades gefüllt.

Die Chinesen und Gälen ließen den Ganzton $\frac{10}{9}$ als engstes Intervall zu; die Orientalen halten noch jetzt Vierteltöne fest, wir wir gesehen haben. Die Griechen haben mit letzteren experimentiert, aber ihren Gebrauch bald aufgegeben, und sind beim halben Ton $\frac{16}{15}$ stehen geblieben.

Die europäischen Völker sind der Entscheidung der Griechen gefolgt und haben den halben Ton $\frac{16}{15}$ als Grenze festgehalten. Das Intervall zwischen dem *Es* und *E*, sowie zwischen dem *As* und *A* der natürlichen Skala ist kleiner, nämlich $\frac{25}{24}$, und wir vermeiden deshalb *Es* und *E* oder *As* und *A* in dieselbe Skala zu bringen. So erhalten wir folgende zwei Reihen von Tonstufen als nächstverwandte für die aufsteigende und absteigende Tonleiter:

[1]) v. Winterfeld, Johannes Gabrieli und sein Zeitalter. Berlin 1834, 1, 73—108.

Aufsteigend: $c \overset{5}{---} e \overset{16}{—} f \overset{9}{—} g \overset{10}{—} a \overset{6}{---} c'$
$\quad\quad\quad

$$c — e — f — g — a — c'$$
$$c — es — f — g — a — c'$$
$$c — es — f — g — as — c'$$

Es sind diese Unterschiede, welche auf einer Verwandtschaft zweiten Grades mittels der Oktave beruhen, zwar sehr gering. Sie sprechen sich aber doch aus in der bekannten Umbildung der aufsteigenden Molltonleiter, auf welche die hier aufgefundenen Unterschiede hindeuten.

Wenn man von c abwärts geht, kann man statt der Verwandten ersten Grades in der Reihe

$$c — — As — G — F — Es — — C$$

auch Verwandte des tieferen C nehmen:

$$c — — A — G — F — E — — C.$$

In der letzteren ist A mit dem Ausgangston c durch die schwache Verwandtschaft ersten Grades 5:6 verbunden, E aber nur durch Verwandtschaft zweiten Grades. Also wird auch hier wieder die dritte Leiter sich gestalten können:

$$c — — A — G — F — Es — — C,$$

welche wir auch aufsteigend fanden. Also haben wir für die absteigenden Leitern die Reihenfolge:

$$c — As — G — F — Es — — C$$
$$c — — A — G — F — Es — — C$$
$$c — — A — G — F — E — — C$$

Überhaupt, da alle entfernteren und näheren, höheren und tieferen Oktaven der Tonika mit dieser so eng verwandt sind, daß sie fast mit ihr identifiziert werden können, sind auch alle höheren und tieferen Oktaven der einzelnen Tonstufen mit der Tonika fast so eng verwandt, als die der Tonika zunächst liegenden desselben Namens.

Auf die Oktave folgen als Verwandte von c seine Oberquinte g und seine Unterquinte F. Deren Verwandte kommen also zunächst bei der Konstruktion der Tonleiter in Betracht. Nehmen wir zunächst die Verwandten von g.

Aufsteigende Leiter:

c verwandt: $c — — e — f — g — a — — c'$

g verwandt: $c \quad d \quad es — — g — — h — c'$

Verbunden gibt dies

1. die Durtonleiter (lydisches Geschlecht der Griechen):

$$c - d - e - f - g - a - h - c'$$
$$1 \quad \tfrac{9}{8} \quad \tfrac{5}{4} \quad \tfrac{4}{3} \quad \tfrac{3}{2} \quad \tfrac{5}{3} \quad \tfrac{15}{8} \quad 2$$

Die Verwandlung des Tones e in es wird hier auch durch die Verwandtschaft mit dem g erleichtert. Dies ergibt

2. die aufsteigende Molltonleiter:

$$c - d - es - f - g - a - h - c'$$
$$1 \quad \tfrac{9}{8} \quad \tfrac{6}{5} \quad \tfrac{4}{3} \quad \tfrac{3}{2} \quad \tfrac{5}{3} \quad \tfrac{15}{8} \quad 2$$

Absteigende Leiter:

c verwandt: $c - - - As - G - F - Es - - - - - C$

g verwandt: $c \; B - - - - G - - - - Es - D \; - \; C$

gibt die

3. absteigende Molltonleiter (hypodorisches oder äolisches Geschlecht der Griechen — Terzengeschlecht):

$$c - B - As - G - F - Es - D - C$$
$$2 \quad \tfrac{9}{5} \quad \tfrac{8}{5} \quad \tfrac{3}{2} \quad \tfrac{4}{3} \quad \tfrac{6}{5} \quad \tfrac{9}{8} \quad 1$$

oder in der gemischten Leiter, welche As in A verwandelt:

4. Septimengeschlecht (Phrygisch der Griechen):

$$c - B - A - G - F - Es - D - C$$
$$2 \quad \tfrac{9}{5} \quad \tfrac{5}{3} \quad \tfrac{3}{2} \quad \tfrac{4}{3} \quad \tfrac{6}{5} \quad \tfrac{9}{8} \quad 1$$

Gehen wir nun über zu den Verwandten der Unterquinte F, so finden wir folgende Leitern:

Aufsteigende Leiter:

c verwandt: $c - - - e - f - g - a - - - c'$

F verwandt: $c - d - - - f - - - a - b - c'$

Dies gibt

5. das Quartengeschlecht (Hypophrygisch oder Ionisch der Griechen):

$$c - d - e - f - g - a - b - c'$$
$$1 \quad \tfrac{10}{9} \quad \tfrac{5}{4} \quad \tfrac{4}{3} \quad \tfrac{3}{2} \quad \tfrac{5}{3} \quad \tfrac{16}{9} \quad 2$$

Verwandeln wir e in es, so erhalten wir wieder

6. das Septimengeschlecht, aber mit anderen Bestimmungen für die Schalttöne d und b:

$$c - d - es - f - g - a - b - c'$$
$$1 \quad \tfrac{10}{9} \quad \tfrac{6}{5} \quad \tfrac{4}{3} \quad \tfrac{3}{2} \quad \tfrac{5}{3} \quad \tfrac{16}{9} \quad 2$$

Absteigende Leiter:

c verwandt: $c - - - - - As - G - F - Es - - - - C$

F verwandt: $c - B - A - - - - - F - - - - Des - C$

gibt

7. das Sextengeschlecht (Dorisch der Griechen):

$$c - B - As - G - F - Es - Des - C$$

$$2 \quad \tfrac{16}{9} \quad \tfrac{8}{5} \quad \tfrac{3}{2} \quad \tfrac{4}{3} \quad \tfrac{6}{5} \quad \tfrac{16}{15} \quad 1$$

So sind die melodischen Tongeschlechter der Griechen und der altchristlichen Kirche hier auf dem konsequent fortgesetzten natürlichen Wege der Ableitung alle wiedergefunden. Alle diese Geschlechter haben in der Tat das gleiche Recht, solange es sich nur um homophonen Gesang handelt.

Ich habe hier zunächst die Leitern in der Weise gegeben, wie sie sich in der natürlichsten Weise ableiten. Aber da wir gesehen haben, daß jede der drei Leitern

$$c - - e - f - g - a - - c'$$
$$c - - es - f - g - a - - c'$$
$$c - - es - f - g - as - - c'$$

sowohl aufsteigend als absteigend durchlaufen werden kann, wenn auch die erste besser zur aufsteigenden, die letzte besser zu absteigenden Bewegung paßt, so können auch die Lücken jeder einzelnen von ihnen entweder ausgefüllt werden mit den *F*-verwandten oder den *g*-verwandten Tönen, und es kann sogar die eine Lücke mit einem *F*-verwandten, die andere mit einem *g*-verwandten gefüllt werden.

Die Zahlenbestimmungen der der Tonika direkt verwandten Töne sind natürlich fest[1]) und unveränderlich, weil sie durch konsonante Verhältnisse zur Tonika direkt gegeben und dadurch sicherer bestimmt sind, als durch jede entferntere Verwandtschaft. Dagegen sind die Ausfüllungstöne vom zweiten Grade der Verwandtschaft allerdings nicht so fest gegeben.

[1]) Ich kann namentlich nicht zugeben, daß, wie Hauptmann will, in die aufsteigende Molltonleiter das pythagoreische *a*, welches die Quinte von *d* ist, gesetzt werde. D'Alembert will dasselbe sogar auch in die Durtonleiter setzen, indem er von *g* nach *h* durch den Fundamentalbaß *d* geht. Das würde eine entschiedene Modulation nach *G*-Dur anzeigen, welche nicht nötig ist, wenn man die natürlichen Beziehungen der Töne zur Tonika festhält. Siehe Hauptmann, Harmonik und Metrik, S. 60.

Für die Sekunde haben wir, wenn $c = 1$:

1. das g-verwandte $d = \frac{9}{8}$,
2. das f-verwandte $d = \frac{10}{9} = \frac{9}{8} \cdot \frac{80}{81}$,
3. das f-verwandte $des = \frac{16}{15}$.

Für die Septime:

1. das g-verwandte $h = \frac{15}{8}$,
2. das g-verwandte $b = \frac{9}{5}$,
3. das f-verwandte $b = \frac{16}{9} = \frac{9}{5} \cdot \frac{80}{81}$.

Während die Töne h und des also ebenfalls sicher gegeben sind, bleiben die Töne b und d unsicher. Beide können mit der Tonika c entweder einen großen ganzen Ton $\frac{9}{8}$ oder einen kleinen $\frac{10}{9}$ bilden.

Um diese Unterschiede der Stimmung fortan sicher und unzweideutig bezeichnen zu können, wollen wir von hier ab eine Bezeichnungsweise der Töne einführen, welche diejenigen Töne, die durch eine Quintenreihe bestimmt sind, unterscheidet von denjenigen, welche durch die Verwandtschaft einer Terz zur Tonika gegeben sind. Wir haben schon gesehen, daß diese beiden verschiedenen Arten der Bestimmung auf etwas verschiedene Tonhöhen führen, und eben deshalb müssen in genauen theoretischen Untersuchungen beiderlei Arten von Tönen voneinander getrennt bleiben, wenn sie auch in der modernen Musik praktisch gewöhnlich miteinander verwechselt werden.

Die wesentliche Idee dieser Bezeichnungsweise rührt von Hauptmann her; da die von ihm und auch von mir in der ersten Auflage dieses Buches benutzten großen und kleinen Buchstaben aber schon eine andere Bedeutung in der Tonschrift haben, wende ich hier eine kleine Modifikation seiner Bezeichnung an.

Wenn C der Ausgangston ist, so bezeichnet man [1]) dessen Quinte mit G, die Quinte dieser Quinte mit D usw.; ebenso die Quarte von C mit F, die Quarte dieser Quarte mit B usw. Es bildet also die Reihe derjenigen Töne, welche mit einfachen ungestrichenen Buchstaben bezeichnet sind, eine Reihe reiner Quinten und Quarten:

$$B — F — C — G — D — A — E \text{ usw.}$$

[1]) Die Natur der Harmonik und Metrik. Leipzig 1853. S. 26 u. ff. — Ich kann mich nur dem Bedauern anschließen, welches C. E. Naumann ausgedrückt hat, daß soviel feine musikalische Anschauungen, welche dieses Werk enthält, unnötigerweise hinter der abstrusen Terminologie der Hegelschen Dialektik versteckt und deshalb einem größeren Leserkreis ganz unzugänglich sind.

Dadurch ist die Höhe aller dieser Töne eindeutig bestimmt, wenn einer von ihnen gegeben ist.

Die große Terz von C dagegen bezeichnen wir mit dem Zeichen $\underline{E}$, die von F mit $\underline{A}$ usw. Die Reihe der Töne

$$B — \underline{D} — F — \underline{A} — C — \underline{E} — G — \underline{H} — D — \underline{Fis} — A \text{ usw.}$$

ist also eine abwechselnde Reihe großer und kleiner Terzen. Dabei ist es klar, daß die Töne

$$\underline{D} — \underline{A} — \underline{E} — \underline{H} — \underline{Fis} \text{ usw.}$$

unter sich wieder eine Reihe reiner Quinten bilden.

Wir haben schon oben gefunden, daß der Ton $\underline{D}$, d. h. die kleine Unterterz oder große Sexte von F tiefer ist, als der von F aus im Quintenzirkel erreichte Ton D, und zwar ist der Unterschied der Tonhöhe ein Komma, dessen Zahlenwert $\frac{81}{80}$ ist, etwa der zehnte Teil eines ganzen Tones. Da nun $D — A$ ebensogut wie $\underline{D} — \underline{A}$ eine reine Quinte ist, so ist auch A um ein ebensolches Komma höher als $\underline{A}$, und ebenso jeder mit einem ungestrichenen Buchstaben bezeichnete Ton um ein Komma höher als der mit dem entsprechenden unterstrichenen Buchstaben bezeichnete Ton, wie man leicht sieht, wenn man in Quinten immer weiterschreitet.

Ein Durakkord schreibt sich also

$$C — \underline{E} — G$$

und ein Mollakkord

$$\underline{A} — C — \underline{E} — \text{ oder } \underline{C} — Es — \underline{G}.$$

Setzen wir nun überhaupt fest, daß jeder Strich unter dem Buchstaben die Tonhöhe um das Intervall $\frac{81}{80}$ erniedrigt, jeder über dem Buchstaben sie um ebensoviel erhöht, so können wir die Durakkorde schreiben:

$$c — \underline{e} — g \text{ oder } \bar{c} — e — \bar{g},$$

die Mollakkorde

$$c — \overline{es} — g \text{ oder } \underline{c} — es — \underline{g}$$

oder auch

$$\bar{c} — \overline{\overline{es}} — \bar{g} \text{ und } \underline{\underline{c}} — \underline{\underline{es}} — \underline{\underline{g}} \text{ usw.}^{1}).$$

[1]) In der ersten Auflage dieses Buches sind, wie bei Hauptmann, die kleinen Buchstaben als um ein Komma niedriger betrachtet worden, als die großen, ein Strich über oder unter den Buchstaben wurde nur zuweilen zur Aushilfe angewendet, bedeutete dann aber Erhöhung oder Erniedrigung um zwei Kommata. Also ein Durakkord schrieb sich $C — e — G$ oder $\bar{c} — E — \bar{g}$, ein Mollakkord $a — C — e$ oder $\underline{A} — c — \underline{E}$ usw. Die in dieser Auflage und auch in der französischen Übersetzung gebrauchte Bezeichnung, ausgegangen von Herrn A. v. Oettingen, ist viel übersichtlicher.

Die drei Reihen der mit C direkt verwandten Töne sind also zu schreiben:

$$C - - \underline{E} - F - G - \underline{A} - - - c$$
$$C - - \overline{Es} - F - G - \underline{A} - - - c$$
$$C - - \overline{Es} - F - G - \overline{As} - - - c$$

und die Fülltöne sind

zwischen Tonika und Terz: D, $\underline{D}$ oder $\overline{Des}$,
zwischen Sexte und Oktave: $\underline{H}$ und B oder $\overline{B}$.

Also die melodischen unter den griechischen und altkirchlichen Tongeschlechtern geben folgende Leitern:

1. Durgeschlecht:

$$C - D - \underline{E} - F - G - \underline{A} - \underline{H} - c$$
$$\underline{D}$$

2. Quartengeschlecht:

$$C - D - \underline{E} - F - G - \underline{A} - B - c$$
$$\underline{D} \qquad\qquad\qquad \overline{B}$$

3. Septimengeschlecht:

$$C - D - \overline{Es} - F - G - \underline{A} - B - c$$
$$\underline{D} \qquad\qquad\qquad \overline{B}$$

4. Terzengeschlecht:

$$C - D - \overline{Es} - F - G - \overline{As} - B - c$$
$$\underline{D} \qquad\qquad\qquad\qquad \overline{B}$$

5. Sextengeschlecht:

$$C - \overline{Des} - \overline{Es} - F - G - \overline{As} - B - c$$
$$\overline{B}$$

In dieser Bezeichnungsweise ist also die Stimmung der Töne genau ausgedrückt dadurch, daß die Art der Konsonanz, in der sie zur Tonika oder deren Verwandten stehen, festgesetzt ist.

Dieselben Leitern in der altgriechischen pythagoreischen Stimmung würden übrigens zu schreiben sein:

Durgeschlecht:

$$C - D - E - F - G - A - H - C$$

und die anderen ähnlich durchaus nur mit Buchstaben gleicher Art, die derselben Quintenreihe angehören.

In den hier aufgestellten Formeln für die diatonischen Tongeschlechter bleibt die Stimmung der Sekunde und Septime teilweise schwankend. Ich habe in diesen Fällen das D vor dem $\underline{D}$ und das B vor dem $\overline{B}$ bevorzugt, weil die Verwandtschaft der Quinte eine nähere ist als die der Terz. Es stehen aber B und D im Quintenverhältnis bzw. zu den der Tonika C nächstverwandten Tönen F und G, $\underline{D}$ und $\overline{B}$ aber nur im Terzenverhältnis. Doch ist dieser Grund wohl nicht ausreichend, die letztgenannten Töne von der Anwendung im homophonen Gesang ganz auszuschließen. Denn wenn in der melodischen Bewegung die Sekunde der Tonart in enge Nachbarschaft zu den mit F verwandten Tönen tritt, z. B. zwischen F und $\underline{A}$ gestellt wird, oder ihnen nachfolgt, so wird es einem genau intonierenden Sänger gewiß natürlicher sein, das dem F und $\underline{A}$ direkt verwandte $\underline{D}$ als das nur im dritten Grade verwandte D anzugeben. Die ein wenig engere Beziehung des letzteren zur Tonika wird hier kaum den Ausschlag geben können.

Auch glaube ich nicht, daß in dieser Zweideutigkeit der ausfüllenden Töne ein Mangel des Tonsystemes liegt, da in dem modernen Mollsystem die Sexte und Septime der Tonart nicht nur um ein Komma, sondern um einen halben Ton geändert werden, je nach der Richtung der melodischen Bewegung. Entscheidendere Gründe für die Anwendung des D statt des $\underline{D}$ werden wir übrigens im nächsten Abschnitt kennen lernen, wenn wir uns von der homophonen Musik zu dem Einfluß der harmonischen Musik auf die Tonleitern hinwenden werden.

Die hier gegebene Darstellung der rationellen Konstruktion der Tonleitern und der entsprechenden Stimmung der Intervalle weicht von der, welche Pythagoras den Griechen gegeben, und welche sich von da bis in die neuesten musikalischen Theorien hinein fortgepflanzt hat, und die auch noch jetzt die Basis unseres Notensystemes bildet, wesentlich ab. Pythagoras ließ die ganz diatonische Leiter aus Quintenschritten entstehen in der Folge

$$F — C — G — D — A — E — H$$

und berechnete danach die Intervalle, wie sie oben angegeben sind. Nach ihm kommen in der diatonischen Leiter nur zweierlei kleinste Intervalle vor, nämlich der Ganzton $\frac{9}{8}$ und das Limma $\frac{256}{243}$.

Wenn in jeder Reihe *C* die Tonika wäre, würde *A* eine Verwandtschaft dritten Grades, *E* eine solche vierten, *H* gar eine fünften Grades zur Tonika haben; Verwandtschaften, welche für die unmittelbare Empfindung des Ohres absolut unwahrnehmbar sein würden.

Quintenfolgen lassen sich auf einem Instrument zwar abstimmen, und so weit fortsetzen, als man will; aber der Sänger und der Hörer können unmöglich bei einem Übergang von *c* nach *e* fühlen, daß der letztere Ton die vierte Quintenstufe von *c* aus ist. Selbst bei einer Verwandtschaft zweiten Grades durch Quinten, wenn man also von *c* nach *d* geht, wird es zweifelhaft sein, ob der Hörer die Verbindung beider Töne fühlen wird. Hier kann man sich aber im Übergang zwischen beiden Tönen noch ein gleichsam stummes *g* eingeschoben denken, welches die untere Quarte von *c*, die untere Quinte von *d* ist, und so die Verbindung, wenn auch nicht für das körperliche Ohr, doch für die Erinnerung herstellt. In diesem Sinn etwa möchte es zu verstehen sein, wenn Rameau und d'Alembert den Übergang von *c* nach *d* durch den vom Sänger hinzugedachten Fundamentalbaß *G* erklären. Wenn der Sänger die Baßnote *G* nicht gleichzeitig mit *d* hört, kann er auch nicht sein *d* so einrichten, daß es mit der Baßnote konsoniert; aber den melodiösen Fortgang kann er durch einen dazwischen gedachten Ton sich allerdings erleichtern. Es ist dies ein Mittel, welches zum Treffen schwieriger Intervalle bekanntlich oft mit Vorteil angewendet wird. Dagegen läßt dies Mittel natürlich im Stich, wenn man zu Tönen von entfernterer Quintenverwandtschaft übergehen sollte.

Endlich liegt in der Quintenreihe auch kein Grund aufzuhören, wenn die diatonische Leiter ausgefüllt ist. Warum schreiten wir nicht vorwärts zur chromatischen Leiter von 12 Halbtönen? Wozu diese seltsame Ungleichheit der Stufen

$$1,\ 1,\ \tfrac{1}{2}\ 1,\ 1,\ 1,\ \tfrac{1}{2},$$

mit der wir unsere Leiter abschließen? Die durch fortgesetzte Quintenfolge neu hinzukommenden Töne würden keine engeren Stufen geben, als schon da sind. Die alte fünftonige Leiter vermied halbe Töne als zu enge Intervalle, wie es scheint. Wenn aber erst einmal zwei in der Leiter waren, warum nicht alle einführen?

Auch das arabisch-persische Musiksystem, soweit es sich in den Schriften ihrer älteren Theoretiker ausgeführt zeigt, kennt

nur die Stimmung nach Quinten. Dieses System, dessen Eigentümlichkeiten, wie es scheint, schon vor der Eroberung durch die Araber im persischen Reich der Sassaniden ausgebildet waren, enthält aber einen sehr wesentlichen Fortschritt gegen das pythagoreische System der Quintenfolgen.

Um das System dieser Musik, welches bisher vollständig mißverstanden ist, nach seinem wahren Sinn zu verstehen, muß man noch folgenden Umstand kennen. Wenn man von *C* aus vier Quinten aufwärts stimmt:

$$C — G — D — A — E,$$

kommt man zu einem *E*, welches um ein Komma $\frac{81}{80}$ höher ist, als die natürliche große Terz von *C*, welche wir mit $\underline{E}$ bezeichnen. Jenes *E* bildet die Terz in der pythagoreischen Tonleiter. Wenn man dagegen von *C* ab durch acht Quinten rückwärts geht:

$$C — F — B — Es — As — Des — Ges — Ces — Fes,$$

kommt man auf einen Ton *Fes*, welcher fast genau übereinstimmt mit dem natürlichen $\underline{E}$. Das Intervall von *C* zu *Fes* wird nämlich ausgedrückt durch das Zahlenverhältnis

$$\frac{8192}{6561} \text{ oder nahehin } \frac{221}{177} = \frac{5}{4} \cdot \frac{885.6}{886.6}.$$

Der Ton *Fes* ist also um das sehr kleine Intervall $\frac{885}{886}$, welches etwa der elfte Teil eines Kommas ist, niedriger als die natürliche Terz $\underline{E}$. Dieser Unterschied zwischen *Fes* und $\underline{E}$ ist praktisch kaum wahrzunehmen, höchstens durch genaue Beobachtung der sehr langsamen Schwebungen, welche der Akkord $C — Fes — G$ auf einem ganz genau gestimmten Instrument geben würde. Wir können daher bei der praktischen Anwendung unbedingt die beiden Töne *Fes* und $\underline{E}$ gleichsetzen, und dementsprechend auch die reinen Quinten derselben $Ces = \underline{H}$, $Ges = \underline{Fis}$ usw.

Nun ist in der arabisch-persischen Skala die Oktave in 17 Stufen eingeteilt, in unserer gleichschwebenden Temperatur aber in 6 ganze Tonstufen, und dadurch ist bei den neueren Interpreten des arabisch-persischen Musiksystemes die Meinung entstanden, jede einzelne von jenen 17 Stufen entspreche nahehin einer Dritteltonstufe unserer Musik. Dann würde in der Tat die Stimmung der arabischen Tonstufen von den unserigen gänzlich abweichend sein, und arabische Musik würde durch unsere Musikinstrumente nicht ausgeführt werden können. Ich

finde aber in Kiesewetters Schrift über die Musik der Araber[1]), welche unter philologischer Beihilfe des berühmten Orientalisten v. Hammer-Purgstall abgefaßt ist, die Übersetzung der Vorschriften, welche Abdul Kadir, ein berühmter persischer Theoretiker des 14. Jahrhunderts unserer Zeitrechnung, der an den Höfen des Timur und Bajazid lebte, über die Teilung des Monochordes gegeben hat; aus diesen ergibt sich die Stimmung der Tonstufen der orientalischen Tonleiter mit voller Sicherheit und Genauigkeit. Auch stimmen diese Vorschriften in den Hauptsachen überein sowohl mit denen, welche der viel ältere Farabi[2]) († 950) als auch der gleichzeitige Mahmud Schirasi[3]) († 1315) für die Einteilung des Griffbrettes der Laute gegeben haben. Nach den Vorschriften des Abdul Kadir ergeben sich sämtliche Tonstufen der arabischen Leiter durch eine Reihe von 16 Quintenschritten, und sind, wenn wir die tiefste Tonstufe *C* nennen, in unserer Bezeichnungweise ausgedrückt, folgende:

1. *C* — 2. *Des* — 3. $\underline{D}$ ⌣ 4. *D* — 5. *Es* — 6. $\underline{E}$ ⌣
7. *E* — 8. *F* — 9. *Ges* — 10. $\underline{G}$ ⌣ 11. *G* — 12. *As* —
13. $\underline{A}$ ⌣ 14. *A* — 15. *B* — 16. $\underline{H}$ — 17. *c* ⌣ 18. *c*

Wo das Zeichen — zwischen zwei Tönen steht, beträgt die Stufe ein pythagoreisches Limma $\frac{256}{243}$ (abgekürzt $\frac{20}{19}$), und wo das Zeichen ⌣ steht, beträgt sie nur ein Komma $\frac{81}{80}$. Das Limma beträgt nahehin $\frac{4}{5}$, das Komma $\frac{1}{5}$ des natürlichen Halbtones $\frac{16}{15}$.

Von den 12 Haupttonarten (Makamat) gibt Abdul Kadir die Tonleitern der drei ersten in folgender Stimmung:

1. Uschak: *C*—*D* —*E* —*F*—*G* —*A* —*B*—*C* (Hypophrygisch),
2. Newa: *C*—*D* —*Es*—*F*—*G* —*As*—*B*—*C* (Hypodorisch),
3. Buselik: *C*—*Des*—*Es*—*F*—*Ges*—*As*—*B*—*C* (Mixolydisch).

Diese drei sind also vollständig identisch mit altgriechischen Tonleitern in pythagoreischer Stimmungsweise. Da von den ara-

[1]) R. G. Kiesewetter, Die Musik der Araber nach Originalquellen dargestellt, mit einem Vorwort von dem Freiherrn v. Hammer-Purgstall. Leipzig 1842. S. 32 und 33. Wesentlich damit übereinstimmend sind die Vorschriften, die in einem anonymen Manuskript aus dem Jahre 666 der Hedschra, im Besitz des Professors Salisbury, gegeben werden. Siehe Journal of the American Oriental Society 1, 204—209.

[2]) J. G. L. Kosegarten, Alii Ispahanensis liber cantilenarum, p. 76—86.

[3]) Kiesewetter, Musik der Araber, S. 33.

bischen Theoretikern diese Leitern abgeteilt werden in die Quarte $C—F$ und die Quinte $F—C$, ferner C, F und B als die festen und unveränderlichen Töne dieser Leitern betrachtet werden, so ist es sehr wahrscheinlich, daß F als Tonika betrachtet werden muß. Dann würde sein:

1. Uschak gleich F-Dur,
2. Newa gleich dem Septimengeschlecht von F,
3. Buselik gleich dem Sextengeschlecht von F;

alle drei aber in pythagoreischer Stimmung; sie werden auch von der persischen Schule als zusammengehörig betrachtet.

Die nächste Gruppe besteht aus fünf Tonarten, welche die natürliche Stimmung zeigen, nämlich:

4. Rast: $C—D—\underline{E}—F—G—\underline{A}—B—c$
5. Husseini: $C—\underline{D}—Es—F—\underline{G}—As—B—c$
6. Hidschaf: $C—\underline{D}—Es—F—\underline{G}—\underline{A}—B—c$
7. Rahewi: $C—\underline{D}—\underline{E}—F—\underline{G}—As—B—c$
8. Sengule: $C—D—E—F—\underline{G}—\underline{A}—B—c$

Man kann Rast ansehen als Quartengeschlecht von C, Hidschaf als dasselbe von F, Husseini als dasselbe von B; als solche hätten sie vollkommen richtige natürliche Stimmung. Im Rahewi, wenn man es auf die Tonika F bezieht, ist die Mollterz As nicht in natürlicher, sondern in pythagoreischer Stimmung; man könnte es als Septimengeschlecht der Tonika F betrachten, in welches aber die große Septime $\underline{E}$ als Leitton statt der kleinen eingetreten ist, wie in unserem Mollgeschlecht. Die natürliche Stimmung eines solchen Tongeschlechtes läßt sich in der Tat mit den vorhandenen 17 Tonstufen nicht genau richtig herstellen; man muß entweder pythagoreische Mollterzen und natürliche Durterzen oder umgekehrt nehmen. Husseini kann betrachtet werden als dieselbe Tonart wie Rahewi, mit derselben falschen Mollterz, aber mit kleiner Septime. Endlich Sengule wäre ein F-Dur mit pythagoreischer Sexte. Die gleiche Auffassung ließe auch Rast zu; beide unterscheiden sich nur durch den verschiedenen Wert der Sekunde G oder $\underline{G}$.

Die vier letzten Makamat enthalten je acht Tonstufen, indem noch Schalttöne eingesetzt sind. Zwei davon sind ähnlich den Tonleitern Rast und Sengule, zwischen B und C ist ein Zwischenton $\underline{c}$ eingesetzt, nämlich:

9. Irak: $C—\underline{D}—\underline{E}—F—G—\underline{A}—B—\underline{c}—c$,
10. Ifzfahan: $C—D—\underline{E}—F—\underline{G}—\underline{A}—B—\underline{c}—c$.

Diese transponiert um eine Quarte, geben:

11. Büsürg: $C-D-\underline{E}-F-\underline{G}-G-A-\underline{H}-c.$

Die letzte ist die Tonleiter:

12. Zirefkend: $C-\underline{D}-Es-F-\underline{G}-As-\underline{A}-\underline{H}-c,$

welche allerdings, wenn sie richtig überliefert ist, eine wunderliche Bildung hat. Sie könnte wie eine Molltonleiter mit großer Septime erscheinen, in der große und kleine Sexte nebeneinander stehen; aber die Quinte $\underline{G}$ wäre dann falsch. Betrachtet man dagegen F als ihre Tonika, so fehlt die Quarte, was freilich beides in der mixolydischen und hypolydischen Tonleiter der Griechen seine Analogie findet. In den Angaben über die letztgenannten achtstufigen Tonreihen herrscht übrigens viel Widerspruch zwischen den verschiedenen von Kiesewetter zitierten Quellen.

Als Haupttonarten werden vier von den zwölf Makamat bezeichnet, nämlich:

1. Uschak = Pythagoreisch F-Dur,
2. Rast = Natürlich C Quartengeschlecht, oder natürlich F-Dur mit höherer Sexte,
3. Husseini = Natürlich F Septimengeschlecht,
4. Hidschaf = Natürlich F Quartengeschlecht.

Wir finden hier also ein entschiedenes Übergewicht der Tonleitern mit vollkommen richtiger natürlicher Stimmung, und diese natürliche Stimmung ist durch eine geschickte Benutzung der fortgesetzten Quintenreihe gewonnen. Dadurch wird dieses arabisch-persische System der Musik für deren Entwickelungsgeschichte sehr beachtenswert. Es kommt noch hinzu, daß wir in einigen dieser Leitern aufsteigende Leittöne vorfinden, welche den griechischen Tonleitern vollkommen fremd waren. So in Rahewi das $\underline{E}$ als Leitton zu F, während über F die Mollterz As steht, welcher Ton in einer griechischen Leiter nicht hätte vorkommen können, ohne auch das $\underline{E}$ in Es zu verwandeln. Ebenso in Zirefkend das $\underline{H}$ als Leitton zu C, während über C die Mollterz Es steht.

Endlich entwickelte sich wenig später in Persien ein neues musikalisches System mit zwölf Halbtonstufen in der Oktave, dem modernen europäischen analog. Kiesewetter macht hier die sehr unwahrscheinliche Hypothese, dasselbe sei durch christliche Missionäre in Persien eingeführt. Indessen ist es klar, daß das bisher beschriebene

siebzehnstufige System im populären Gebrauch, wenn das Gefühl für die feineren Unterschiede sich abstumpfte, und die nur um ein Komma verschiedenen Töne gleich gesetzt wurden, in das System der zwölf Halbtonstufen übergehen mußte. Dazu war gar kein fremder Einfluß nötig; außerdem war das griechische Musiksystem den Arabern und Persern längst durch Farabi gelehrt worden; über dieses hinaus war die europäische Musiktheorie des 14. und 15. Jahrhunderts auch noch nicht wesentlich fortgeschritten, die Studien in der Harmonie abgerechnet, welche aber bei den Orientalen niemals Aufnahme gefunden haben. Die damaligen Europäer konnten also in der Tat in jener Zeit außer den unvollkommenen Anfängen der Harmonie den Orientalen nichts lehren, was diese nicht schon besser wußten. Viel eher, glaube ich, kann die Frage aufgeworfen werden, ob nicht erstens die unvollkommenen Brocken des natürlichen Systemes, die sich bei den alexandrinischen Griechen finden, auf persischen Überlieferungen beruhen, und zweitens, ob nicht auch die Europäer zur Zeit der Kreuzzüge mancherlei in der Musik von den Orientalen gelernt haben. Daß sie die lautenartigen Instrumente mit Griffbrett und die Streichinstrumente vom Orient empfangen haben, ist sehr wahrscheinlich. Im Bau der Tonarten könnte hier namentlich der Gebrauch des Leittones in Frage kommen, den wir bei den Orientalen gefunden haben, und der nun auch in der abendländischen Musik zu erscheinen beginnt.

In der Anwendung der großen Septime der Tonart als eines Leittones zur Tonika liegt ein neues Moment, welches zur weiteren Ausbildung des Zusammenhanges der Tonstufen einer Tonleiter benutzt werden konnte, und zwar noch innerhalb des Bereiches der rein homophonen Musik. Der Ton *H* in der *C*-Durleiter hat von allen Tönen der Leiter die schwächste Verwandtschaft zur Tonika *C*, da er als Terz der Dominante *G* eine schwächere Verwandtschaft zu dieser hat als deren Quinte *D*. Dies dürfen wir wohl als den Grund dafür ansehen, daß in denjenigen gälischen Liedern, welche noch einen sechsten Ton in die Leiter aufgenommen haben, gewöhnlich die Septime wegbleibt. Andererseits aber tritt für die Septime *H* eine eigentümliche Beziehung zur Tonika ein, welche die neuere Musik eben als das Verhältnis des Leittones bezeichnet. Die große Septime *H* ist nämlich von der Oktave *c* der Tonika nur durch das

kleinste Intervall der Skala, einen halben Ton, getrennt, und sie ist vermöge dieser Nachbarschaft der Tonika leicht und ziemlich sicher zu treffen, selbst wenn man von Tönen der Skala ausgeht, die zum $\underline{H}$ gar keine Verwandtschaft haben. Der Sprung $F—\underline{H}$ z. B. ist mißlich auszuführen, weil jede Verwandtschaft zwischen beiden Tönen fehlt. Wenn aber zu singen ist $F—\underline{H}—c$, so denkt sich der Sänger den Schritt $F—c$, den er leicht ausführt, treibt aber die Stimme nicht ganz bis zum c in die Höhe, sondern setzt beim $\underline{H}$ etwas tiefer ein, ehe er sie ganz zum c steigen läßt. Dadurch erscheint das $\underline{H}$ als eine Art von Vorhalt des c; es ist bei einem solchen Schritt auch für den Hörer nur als Vorstufe des c gerechtfertigt; dieser erwartet also nun den Übergang in c. Deshalb sagt man, daß das $\underline{H}$ nach c hinleite; $\underline{H}$ ist der Leitton für die Tonika c. In diesem Sinn geschieht es denn auch leicht, daß das $\underline{H}$ etwas höher intoniert wird, etwa wie H, um es dem c noch mehr zu nähern, wodurch das Verhältnis noch schärfer bezeichnet wird.

Meinem Gefühl nach tritt das Verhältnis des $\underline{H}$ als Leitton zu c viel mehr hervor, wenn man die Gänge $F—\underline{H}—c$ oder $F—\underline{A}—\underline{H}—c$ macht, in denen $\underline{H}$ den vorausgehenden Tönen nicht verwandt ist, als in dem Gang $G—\underline{H}—c$ z. B. Doch habe ich in musikalischen Schriften nichts über diesen Punkt angegeben gefunden, weiß also nicht, ob die Musiker dieser Behauptung beizustimmen geneigt sind. Bei der anderen Halbtonstufe der Leiter $\underline{E}—F$ erscheint $\underline{E}$ nicht als Leitton zu F, wenn die Tonalität der Melodie gut eingehalten ist, weil dann das $\underline{E}$ seine selbständige Beziehung zur Tonika C hat und dadurch für das musikalische Gefühl sicher bestimmt ist. Deshalb wird der Hörer nicht veranlaßt, das $\underline{E}$ nur als Vorstufe von F gerechtfertigt zu finden. Ebenso ist es beim Schritt $G—\overline{As}$ der Molltonart. Das G ist durch eine nähere Verwandtschaft zur Tonika C bestimmt, als $\overline{As}$. Dagegen hat Hauptmann nicht Unrecht, wenn er den Schritt $D—\overline{Es}$ der Molltonart, wie schon oben erwähnt ist, als einen solchen betrachtet, der das D als Leitton zu $\overline{Es}$ erscheinen lassen kann, weil D nämlich auch nur durch eine Verwandtschaft zweiten Grades zur Tonika G bestimmt ist, wenn auch durch eine etwas festere als $\underline{H}$.

Vollständig ähnlich dem $\underline{H}$ der Durtonleiter ist aber in dieser Beziehung das $\overline{Des}$ des Sextengeschlechtes (des dorischen Geschlechtes

der Griechen) bei absteigender Bewegung; es bildet in der Tat eine Art absteigenden Leittones, und da die Griechen in ihrer Blütezeit absteigende Melodiegänge edler und wohlklingender fanden [1]), mag die Eigentümlichkeit des dorischen Tongeschlechtes, einen solchen absteigenden Leitton zu besitzen, für sie von besonderer Bedeutung gewesen sein und die Bevorzugung dieses Geschlechtes bedingt haben Ja der Schluß mit dem übermäßigen Sextenakkord

$$\overline{Des} - F - G - \underline{H}$$
$$C - \overline{Es} - G - c$$

ist fast die einzige isoliert und unverstanden in der neueren Musik stehengebliebene Ruine der alten Tongeschlechter. Es ist dies ein dorischer Schluß, in welchem gleichzeitig $\overline{Des}$ und $\underline{H}$ als Leittöne für C auftreten.

Das Verhältnis der Sekunde der dorischen Tonleiter (ihrer Parhypate) zum tiefsten Ton (Hypate) derselben Leiter als Leitton scheinen übrigens die Griechen wohl gefühlt zu haben, nach den Bemerkungen, welche Aristoteles im dritten und vierten seiner Probleme über Harmonie darüber macht, und welche ich mir nicht versagen kann, hier anzuführen, weil sie das Verhältnis wieder vortrefflich und fein charakterisieren. Er fragt nämlich, warum man eine stärkere Anstrengung der Stimme fühle, wenn man die Parhypate singe, als bei der Hypate, obgleich beide durch ein so kleines Intervall getrennt seien. Die Hypate werde mit Nachlaß der Anstrengung gesungen. Und dann fügt er hinzu, daß neben der Überlegung, welche den Willen zur Folge habe, auch noch die Art der Willensanstrengung dem Geist ganz heimisch und bequem sein müsse, wenn nämlich das Beabsichtigte leicht erreicht werden solle [2]). Die Anstrengung, welche wir fühlen, wenn wir den Leitton singen, liegt eben nicht im Kehlkopf, sondern darin, daß es schwer ist, die Stimme durch den Willen auf ihm festzustellen, während uns schon ein anderer Ton im Sinn liegt, auf den wir übergehen wollen, und durch dessen Nähe wir den Leitton gefunden haben. Erst in dem Schlußton fühlen wir uns heimisch und beruhigt, und singen diesen deshalb ohne Willensanstrengung.

[1]) Aristoteles, Problemata XIX, p. 33.

[2]) Durch diese Umschreibung glaube ich den Sinn richtig wiederzugeben von der Stelle: *δεῖ γὰρ μετὰ συννοίας καὶ καταστάσεως οἰκειοτάτης τῷ ἤθει πρὸς τὴν βούλησιν.*

Die nahe Nachbarschaft in der Skala gibt ein neues verknüpfendes Band zwischen zwei Tönen, welches sowohl in dem eben betrachteten Verhältnis des Leittones sich wirksam erweist, als bei den früher erwähnten Einschaltungen von Tönen zwischen zwei andere im chromatischen und enharmonischen Geschlecht. Es verhält sich hier mit den Entfernungen der Töne nach der Tonhöhe gerade so wie bei der Abmessung räumlicher Entfernungen. Wenn wir Mittel haben, einen Punkt (die Tonika) sehr genau und sicher zu bestimmen, so können wir mit dessen Hilfe auch andere Punkte sicher bestimmen, die in bekannter kleiner Entfernung (Intervall des halben Tones) von jenem abstehen, während wir sie direkt vielleicht nicht so sicher hätten bestimmen können. So braucht der Astronom seine mit äußerster Genauigkeit abgemessenen Fundamentalsterne, um mit deren Hilfe dann auch andere benachbarte Sterne genau bestimmen zu können.

Ich bemerke hierbei, daß das Intervall eines halben Tones auch als Vorhaltsnote (Apoggiatura) eine besondere Rolle spielt. Wir können als Vorhalt zu einem Ton der Melodie einen in der Leiter nicht enthaltenen Ton wählen, der einen halben Ton von dem Ton, in den wir übergehen wollen, entfernt ist, aber nicht einen solchen, der um einen Ganzton von letzterem entfernt ist. Die Rechtfertigung seiner Wahl findet das Halbtonintervall in diesen Fällen allerdings nur als ein uns wohlbekanntes Intervall der diatonischen Leiter, welches wir sicher intonieren und welches der Zuhörer sicher versteht, auch wenn in der gerade vorliegenden Passage, in der es ausgeführt wird, die Verwandtschaftsverhältnisse, auf denen seine Größe beruht, nicht deutlich fühlbar sind. Es kann also keineswegs jedes willkürlich gewählte kleine Intervall in gleicher Weise angewendet werden, wenn auch kleine Veränderungen des Leittonintervalles von den praktischen Musikern angebracht werden können, die das Drängen zur Tonika stärker ausdrücken, aber nicht so weit gehen dürfen, daß die Veränderung deutlich erkannt wird.

Die große Septime als Leitton zur Tonika gewinnt also ein besonders nahes Verhältnis zu dieser, welches der kleinen Septime nicht zukommt. Es wird dadurch derjenige Ton der Leiter, dessen Verwandtschaft zur Tonika die schwächste ist, zu einer besonderen Bedeutung erhoben. Dieser Umstand hat sich in der modernen Musik,

welche überall möglichst deutliche Beziehungen zur Tonika herzustellen sucht, immer mehr geltend gemacht, und hat bewirkt, daß bei aufsteigender Bewegung zur Tonika die große Septime in allen Tonarten bevorzugt wurde, auch in denjenigen, denen sie ursprünglich nicht zukam. Diese Umänderung scheint in Europa während der Periode der polyphonen Musik begonnen zu haben, aber nicht nur in mehrstimmigen Gesängen, sondern auch in dem einstimmigen *Cantus firmus* der römischen Kirche. Sie wurde 1322 durch einen Erlaß des Papstes Johannes XXII. gerügt. Infolgedessen unterließ man gewöhnlich die Erhöhung des Leittones in den Noten zu bezeichnen, während sie doch von den Sängern ausgeführt wurde, was nach Winterfelds Ansicht sogar noch im 16. und 17. Jahrhundert bei protestantischen Tonsetzern geschah, da es einmal Sitte geworden war. Eben deshalb ist es unmöglich, den Fortschritt dieser Veränderung der alten Tonarten genau zu ermitteln[1]).

Noch jetzt übrigens sträuben sich nach A. v. Oettingens Bericht[2]) die Esthen, in Chorälen der Molltonart den Leitton zu singen, selbst wenn er ihnen deutlich durch die Orgel angegeben wird; ebenso nach Herrn A. le Jolis die Landleute bei Cherbourg[3]).

Unter den alten Tongeschlechtern hatte nur das lydische der Griechen und das unmelodische hypolydische (Quintengeschlecht) die große Septime als Leitton zur Tonika; ersteres entwickelte sich daher als das Haupttongeschlecht der neueren Musik, als unser Durtongeschlecht. Von ihm war das ionische (Quartengeschlecht) durch weiter nichts als die kleine Septime unterschieden. Ließ man diese in die große übergehen, so ging dies Geschlecht ebenfalls in Dur über. Die anderen drei sind, indem man ihnen die große Septime gegeben hat, während des 17. Jahrhunderts allmählich in unser Moll zusammengeflossen. Aus dem phrygischen (Septimengeschlecht) wird, wenn man B in $\underline{H}$ ändert, die

aufsteigende Molltonleiter

$$C - D - \overline{Es} - F - G - \underline{A} - \underline{H} - c,$$

wie wir sie auch vorher schon unter Berücksichtigung der Tonverwandtschaften allein gefunden hatten. Das hypodorische (Terzen-

[1]) Der evangelische Kirchengesang. Leipzig 1843. Bd. I. Einleitung.

[2]) Das Harmoniesystem in dualer Entwickelung. Dorpat und Leipzig 1866. S. 113.

[3]) A. le Jolis, La tonalité du plain-chant. Révue archéologique. XV. année. 1859.

geschlecht), welches unserer absteigenden Molltonleiter entspricht, gibt bei der Änderung von B in $\underline{H}$ die

instrumentale Molltonleiter

$$C-D-\overbrace{Es}-F-G-\overbrace{As}-\underline{H}-c,$$

welche von Sängern wegen des Sprunges $\overbrace{As}-\underline{H}$ schwer auszuführen ist, in der modernen Instrumentalmusik aber sowohl aufsteigend wie absteigend oft vorkommt.

Das dorische (Sextengeschlecht) ist mit großer Septime in der vorher erwähnten Schlußkadenz durch den übermäßigen Sextenakkord noch zu finden.

Die allgemeine Einführung des Leittones bezeichnet also das immer konsequenter sich entwickelnde Gefühl für die Herrschaft einer Tonika in der Tonleiter. Durch diese Änderung wird nicht nur die Mannigfaltigkeit der alten Tongeschlechter arg beeinträchtigt und der Reichtum der bisherigen Ausdrucksmittel wesentlich verringert, sondern es wird auch der kettenartige Zusammenhang der Töne der Tonreihe untereinander durchbrochen und zerstört. Wir haben gesehen, wie nach der ältesten Theorie die Tonsysteme Quintenreihen waren, erst von vier, dann von sechs Quintenschritten. Die überwiegende Herrschaft einer Tonika als des einzigen Zentrums des Systemes war äußerlich wenigstens noch nicht angedeutet oder zeigte sich höchstens mittelbar dadurch, daß man die Zahl der Quintenschritte beschränkte auf diejenigen Töne, die auch in der natürlichen Leiter vorkommen. Alle griechischen Tongeschlechter lassen sich aus den Tönen der Quintenfolge

$$F-C-G-D-A-E-H$$

bilden. Sobald man aber zur natürlichen Stimmung der Terzen übergeht, stört man die Reihen der Quinten schon durch eine nicht ganz richtige Quinte

$$F-C-G-D-\underline{A}-\underline{E}-\underline{H}.$$

In dieser Reihe ist die Quinte $D-\underline{A}$ unrein. Und wenn man endlich den erhöhten Leitton einführt, z. B. $\underline{\underline{Gis}}$ statt G in $\underline{A}$-Moll, so durchbricht man die Reihe vollkommen.

Bei der allmählichen Ausbildung des diatonischen Systemes sind also schrittweise die Rücksichten auf die kettenweise Verwandtschaft aller Töne untereinander geopfert worden den anderen Rücksichten, welche durch die Forderung, alle Töne mit einem einzigen Zentrum

zu verknüpfen, entstanden. Und in dem Maße, wie dies geschah, sahen wir auch, daß der Begriff der Tonalität im Bewußtsein der Musiker sich deutlich entwickelte.

Die weitere Entfaltung des europäischen Tonsystemes hängt nun aber von der Ausbildung der Harmonie ab, zu welchem Gegenstand wir im nächsten Abschnitt übergehen wollen.

Ehe wir aber den eben behandelten Gegenstand verlassen, sind noch einige Zweifel zu beseitigen. Ich habe in dem vorliegenden Abschnitt die melodische Verwandtschaft der Töne ebenso von ihren Obertönen abhängig gemacht, wie es sich für die Verhältnisse der Konsonanz im zehnten Abschnitt ergeben hatte. Es fällt diese Darstellungsweise in einem gewissen Sinn zusammen mit der beliebten Behauptung, daß Melodie eine aufgelöste Harmonie sei, auf welche musikalische Systeme zu gründen man keinen Anstand nimmt, ohne zu fragen, wie denn Harmonien in Melodien aufgelöst werden konnten in Zeiten und bei Völkern, welche noch gar keine Harmonien gehört hatten, oder noch jetzt sie anzuwenden verschmähen. Unserer Darstellung gemäß würden wenigstens dieselben Eigentümlichkeiten in der Zusammensetzung der Klänge, welche für die Konsonanz im Zusammenklang den Ausschlag geben, auch die melodische Verwandtschaft in der Aufeinanderfolge bestimmen. Die erstere wäre demnach zwar nicht der Grund der letzteren, wie es die oben angeführte Redeweise behauptet, aber beide hätten einen gemeinsamen Grund in der Zusammensetzung der Klänge.

Nun haben wir aber bei den Konsonanzen noch gewisse andere Verhältnisse, nämlich die Kombinationstöne, wirksam gefunden, die ihren Einfluß namentlich im Zusammenklang einfacher Töne geltend machen, oder in dem von Klängen mit wenigen und schwachen Obertönen. Ich habe oben schon auseinander gesetzt, daß die Kombinationstöne nur sehr unvollständig die Wirkungen der Obertöne in dem Zusammenklang zu ersetzen vermögen, und daß deshalb Akkorde von einfachen Tönen gebildet, matt und charakterlos erscheinen, weil die Gegensätze der Konsonanz und Dissonanz nur sehr unvollkommen entwickelt sind.

In der melodischen Folge können sich aber Kombinationstöne gar nicht geltend machen, und es tritt also die Frage auf, inwiefern eine melodische Wirkung durch eine Folge einfacher Töne hervorgebracht werden könne. Daß man Melodien, welche von den gedackten

Registern der Orgel ausgeführt, oder mit dem Munde gepfiffen, oder auf der Glasharmonika, auf Holz- oder Stahlstäbchen, in einer Spieldose oder mit einem Glockenspiel gespielt werden, wiedererkennt, ist unzweifelhaft; ebenso unzweifelhaft aber, daß alle diese Instrumente, welche entweder nur einfache Töne, oder schwache, meist weit entfernte und unharmonische Nebentöne liefern, ohne Begleitung eigentlich musikalischer Instrumente keine eindrucksvolle Wirkung der Melodie hervorzubringen imstande sind. Zur Führung vereinzelter Stimmen in Begleitung der Orgel oder des Orchesters, oder des Klaviers können sie oft sehr wirksam sein; aber isoliert für sich geben sie entweder eine sehr ärmliche oder, wenn die unharmonischen Nebentöne stärker hervortreten, sogar eine widerwärtige Musik.

Indessen müssen wir doch auch von der Tatsache Rechenschaft ablegen, wie denn überhaupt etwas, was den Eindruck einer Melodie macht, von solchen Instrumenten gebildet werden kann.

Da ist nun erstens zu bemerken, daß, wie ich am Ende des siebenten Abschnittes auseinander gesetzt habe, schon durch die Konstruktion des Ohres die Entstehung schwacher harmonischer Obertöne im Ohr bei allen starken objektiv einfachen Tönen begünstigt wird, und also höchstens leise einfache Töne auch in der subjektiven Empfindung als vollkommen einfach zu betrachten sind.

Zweitens kommt hierbei eine Wirkung des Gedächtnisses in das Spiel. Sobald ich in allen möglichen Tonhöhen Quintenschritte habe ausführen hören, die sich in der Empfindung meines Ohres als Schritte von sehr enger melodischer Verwandtschaft rechtfertigten, so kenne ich die Größe eines solchen Schrittes für jeden Teil der Skala aus Erfahrung, und behalte diese Kenntnis vermöge meines Sinnengedächtnisses, d. h. vermöge des Gedächtnisses, welches wir für sinnliche Eindrücke, auch für solche, die nicht in Worte zu fassen sind, haben.

Höre ich nun einen solchen Schritt durch Stimmgabeltöne ausführen, so kann ich ihn wiedererkennen als einen oft gehörten Schritt von wohlbekannter Weite auch in einem Fall, wo die harmonischen Obertöne fehlen oder sehr schwach sind, die ihn sonst als einen bevorzugten Schritt von enger melodischer Verwandtschaft rechtfertigen. Ebenso werde ich andere melodische Schritte oder ganze Melodien als bekannt wiedererkennen können, wenn sie in einfachen Tönen ausgeführt werden; und höre ich eine Melodie zum erstenmal in dieser

Weise, mit dem Munde gepfiffen oder von einer Spieluhr, einer Glasharmonika vorgetragen, so kann ich mir durch die Phantasie ergänzen, wie sie klingen würde, von einem eigentlich musikalischen Instrument, einer menschlichen Stimme oder Violine ausgeführt.

Ein geübter Musiker kann sich, indem er die Noten liest, eine Vorstellung von einer Melodie machen; geben wir auf einer Glasharmonika die Grundtöne dieser Noten an, so unterstützen wir die Vorstellung noch unmittelbarer, indem wir einen großen Teil des sinnlichen Eindruckes wirklich hervorrufen, den die Melodie gäbe, wenn sie gesungen würde. Dennoch haben wir bei dem Gebrauch einfacher Töne nur ein Schema der Melodie. Es fehlt hier noch alles, was ihren Reiz bedingt. Wir kennen die einzelnen Intervalle, die in einer solchen Melodie erscheinen, aber es fehlt ihnen der unmittelbare sinnliche Eindruck, der die wohlvermittelten von den entfernter verwandten oder von den ganz unvermittelt einsetzenden trennt. Man denke nur an den Unterschied, den es macht, ob eine Melodie mit dem Munde gepfiffen oder von einer Violine vorgetragen, ob sie auf der Glasharmonika oder auf dem Klavier gespielt wird. Es ist ungefähr derselbe Unterschied, wie zwischen einer einzelnen Photographie einer Landschaft und dem stereoskopischen Anblick eines entsprechenden Paares von Photographien. Jene einzelne erlaubt mir mit Hilfe meines Gedächtnisses eine Vorstellung von den Tiefendimensionen des gesehenen Objektes zu bilden, die unter Umständen recht genügend sein kann. Die stereoskopische Vereinigung dagegen gibt mir den wirklichen sinnlichen Eindruck wieder, den mir das Objekt in bezug auf seine Formen gegeben haben würde, und den ich mir bei dem einfachen Bilde aus Erfahrung und Erinnerung ergänzen muß. Daher dem stereoskopischen Bilde eben die größere Lebendigkeit zukommt, welche der unmittelbare sinnliche Eindruck vor der Erinnerung voraus hat.

Ähnlich scheint es mir mit den in einfachen Tönen ausgeführten Melodien zu sein. Man erkennt sie wieder, wenn man sie schon einmal gehört hat; man kann sich allenfalls bei genügender Lebhaftigkeit musikalischer Einbildungskraft denken, wie sie von anderen Instrumenten ausgeführt klingen würden, aber der unmittelbare sinnliche Eindruck des musikalischen Reizes fehlt ihnen entschieden.

Fünfzehnter Abschnitt.

Die konsonanten Akkorde der Tonart.

Die erste Form, in welcher mehrstimmige Musik einen gewissen Grad künstlerischer Vollendung erreichte, war die der Polyphonie. Das eigentümlich unterscheidende Merkmal dieser Richtung beruht darin, daß mehrere Stimmen nebeneinander hergehen, deren jede eine selbständige Melodie führt, sei diese nun eine Wiederholung der von den anderen Stimmen vorher ausgeführten Melodien oder ganz verschieden von jenen. Unter diesen Umständen mußte nun jede Stimme dem allgemeinen Gesetz aller Melodiebildung, nämlich dem Gesetz der Tonalität, unterworfen sein, und zwar mußten sämtliche Töne des polyphonen Satzes sich notwendig auf dieselbe Tonika beziehen. Es mußte also jede Stimme an und für sich von der Tonika oder einem ihr nächstverwandten Ton ausgehen und wieder in die Tonika zurückkehren. In der Tat ließ man anfangs alle Stimmen eines mehrstimmigen Satzes in die Tonika oder eine ihrer Oktaven zusammenlaufen. So war für jede Stimme das Gesetz der Tonalität erfüllt, aber man war gezwungen, einen polyphonen Satz unisono zu schließen.

Der Grund, warum höhere Oktaven die Tonika im Schluß begleiten können, liegt, wie wir im vorigen Abschnitt gesehen haben, darin, daß die höhere Oktave nur eine Wiederholung eines Teiles ihres Grundtones ist. Wenn wir also im Schluß zur Tonika eine ihrer höheren Oktaven hinzusetzen, so tun wir nichts, als daß wir einen Teil ihres Klanges verstärken; es kommt dadurch kein neuer Klang dazu, der Zusammenklang enthält immer nur die Bestandteile des Klanges der Tonika.

Dasselbe gilt nun ebenso für andere Partialtöne des Klanges der Tonika. Der nächste Schritt in der Entwickelung des Schlußakkordes war, daß man die Duodezime der Tonika hinzufügte. Der Akkord

$c — c' — g'$ enthält keine Bestandteile, welche nicht auch Bestandteile des Klanges von c allein sind, und insofern wird jener Akkord ein Musikstück, dessen Tonika c ist, passend schließen können, indem der Akkord als Vertreter des einfachen Klanges von c gebraucht werden kann.

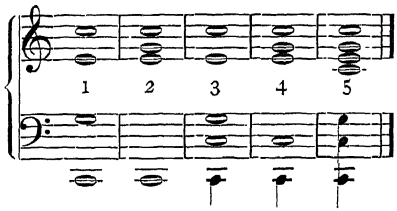
Ja auch der Akkord $c' — g' — c''$ wird in demselben Sinn gebraucht werden können; denn wenn man ihn angibt, kommt, schwach freilich, aber doch hörbar, der Kombinationston c hinzu, und die ganze Klangmasse enthält dann wieder nur Bestandteile des Klanges c. Freilich würde diese Zusammensetzung schon einer ungewöhnlicheren Klangfarbe mit verhältnismäßig schwachem Grundton entsprechen.

Dagegen kann als Schluß eines Satzes, dessen Tonika c ist, der Zusammenklang $c — c' — f'$ oder $c' — f' — c''$ nicht gebraucht werden, obgleich diese Akkorde ebensogut konsonant sind, wie die vorher genannten, weil das f nicht Bestandteil des Klanges c ist, und deshalb im Schluß neben dem Klang der Tonika etwas Fremdartiges stehen bleiben würde. Wahrscheinlich ist in dieser Tatsache der Grund zu suchen, warum einige Theoretiker des Mittelalters die Quarte zu den Dissonanzen rechnen wollten. Im Schlußakkord ist aber die Reinheit der Konsonanz noch nicht genügend, um ein Intervall anwendbar zu machen. Es kommt noch eine zweite Bedingung hinzu, über welche die Theoretiker sich nicht klar geworden waren; die Töne des Schlußakkordes müssen Bestandteile des Klanges der Tonika sein, sonst sind sie nicht zu brauchen.

Wie die Quarte ist die Sexte der Tonika im Schlußakkord nicht anwendbar, wohl aber die große Terz, da diese wieder im Klang der Tonika vorkommt, dessen fünften Partialton sie bildet. Da die musikalisch brauchbaren Klangfarben den fünften und sechsten Partialton zwar gewöhnlich noch hören lassen, die höheren aber gar nicht mehr oder wenigstens nur sehr unvollkommen, von diesen höheren Obertönen außerdem der nächstfolgende, nämlich der siebente dissonant zum fünften, sechsten und achten ist, und in der Leiter fehlt, so hört mit der Terz die Reihe der brauchbaren Töne des Schlußakkordes auf. So finden wir denn auch in der Tat in den Schlußakkorden bis zum Anfang des 18. Jahrhunderts hin teils Akkorde ohne Terzen, teils Durakkorde mit großen Terzen gebraucht; letztere auch in solchen Tongeschlechtern, deren Leiter die kleine, nicht die große Terz der

Tonika enthält. Um der Vollstimmigkeit willen zog man es vor, die Konsequenz der Tonleiter zu verletzen, indem man die große Terz im Schlußakkord auftreten ließ. Die kleine Terz der Tonika kann niemals als Bestandteil in dem Klang der letzteren auftreten. Sie war also ursprünglich ebensogut verboten, wie die Quarte und Sexte der Tonika. Es mußte erst eine neue Seite des harmonischen Gefühles ausgebildet werden, ehe Mollakkorde als Schluß zulässig erschienen.

Der Schluß in einem Durakkord erscheint um so genügender, je mehr in der Lage der Töne des Akkordes die Anordnung der Partialtöne eines Klanges nachgeahmt ist. Da in der neueren Musik die Oberstimme, als die hervortretendste von allen, die Hauptmelodie zu führen pflegt, muß diese der Regel nach in der Tonika enden. Mit Berücksichtigung dieses Umstandes kann man für den Schluß Akkorde wie die folgenden brauchen, deren Kombinationstöne in Viertelnoten hinzugefügt sind:



In den Akkorden 1 und 2 fallen alle Noten mit Obertönen des tiefen *C* zusammen; bei diesen ist die Ähnlichkeit des Akkordes mit dem Klang *C* am entschiedensten. Demnächst werden aber dafür auch engere Lagen des Akkordes substituiert werden können, wenn sie nur darin den ersten beiden ähnlich bleiben, daß *C* als Grundton stehen bleibt, wie in 3, 4 und 5. Sie behalten dann noch hinreichende Ähnlichkeit mit dem Klang des tiefen *C*, daß man sie als Ersatz desselben brauchen kann. Außerdem kommen die Kombinationstöne zu Hilfe, die in Viertelnoten bei 3, 4 und 5 angegeben sind, und welche die tieferen Teile des Klanges *C*, wenn auch schwach, hörbar machen. Aber die ersteren Lagen werden immer einen befriedigenderen Schluß geben. Das Streben nach einem tiefen Schlußton in der harmonischen Musik ist sehr charakteristisch, und ich glaube in der gegebenen Erklärung den Grund davon zu finden. Es besteht nichts davon in der Bildung homophoner Melodien, sondern ist nur der Baßstimme vielstimmiger Sätze eigen.

Ebenso wie die Tonika als Baßton ihres Durakkordes am Schluß diesem Akkord eine Ähnlichkeit mit ihrem eigenen Klang gibt, und dadurch als wesentlichster Ton des Akkordes heraustritt, geschieht dies auch mit den übrigen Durakkorden, wenn der tiefste Ton der engsten Lage ihres Dreiklanges Grundton ist. Die anderen in der Durtonleiter liegenden Durakkorde sind die auf der Quarte und Quinte der Tonart, also in *C*-Dur $F-\underline{A}-C$ und $G-\underline{H}-D$. Läßt man also die Harmonie des Stückes sich nur in diesen Durakkorden bewegen, den Grundton immer im Baß, so stellt sie bis zu einem gewissen Grad den Klang der Tonika dar, welcher wechselt mit den beiden nächstverwandten Klängen, denen der Quarte und Quinte der Tonika. Dadurch erhält eine solche Harmonisierung eine sehr klare Durchsichtigkeit und Geschlossenheit, wenn sie auch für längere Stücke zu einförmig wird. Dieser Art ist bekanntlich der Bau der modernen populären Tonstücke, der Volkslieder und Tänze. Das Volk und überhaupt Leute von geringer musikalischer Bildung verlangen möglichst einfache und verständliche Verhältnisse von der Musik, die ihnen gefallen soll. Nun gibt sich aber überhaupt in der harmonischen Musik die Verwandtschaft der Töne dem Gefühl viel leichter und entschiedener zu erkennen, als in der homophonen Musik. In der letzteren beruht das Gefühl für Tonverwandtschaft eben nur darin, daß die Tonhöhe zweier Partialtöne in zwei aufeinander folgenden Klängen gleich ist. Wenn wir aber den zweiten hören, können wir uns des ersten nur noch erinnern, und mittels der Erinnerung müssen wir die Vergleichung vollziehen. In der Konsonanz ist dagegen die Verwandtschaft durch unmittelbare Sinnesempfindung gegeben; da sind wir nicht mehr auf die Erinnerung angewiesen, sondern wir hören Schwebungen, der Zusammenklang wird rauh, sowie die richtigen Verhältnisse nicht eingehalten sind. Und wiederum, wenn zwei Akkorde aufeinander folgen, welche eine gemeinsame Note haben, so beruht die Anerkennung ihrer Verwandtschaft nicht auf der Vergleichung schwacher Obertöne, sondern auf der Vergleichung zweier selbständig angegebenen Noten, welche dieselbe Tonstärke wie die übrigen Noten des betreffenden Akkordes haben.

Wenn ich also z. B. von *C* nach seiner Sexte $\underline{A}$ steige, so erkenne ich in einer einstimmigen Melodie die Verwandtschaft beider dadurch, daß der fünfte Oberton von *C*, der schon ziemlich schwach ist, dem

dritten von $\underline{A}$ gleich ist. Wenn ich aber das $\underline{A}$ mit dem Akkord $F-\underline{A}-c$ begleite, so höre ich das frühere c in dem Akkord kräftig fortklingen, und nehme in unmittelbarer Empfindung wahr, daß $\underline{A}$ und C konsonant sind, daß beide Bestandteile desselben F-Klanges sind.

Wenn ich von C nach $\underline{H}$ oder D in einstimmigem Gesang melodisch übergehe, muß ich mir eine Art von stummem G dazwischen denken, um ihre Verwandtschaft, welche nur zweiten Grades ist, anzuerkennen. Lasse ich aber neben beiden Noten das G wirklich erklingen, so wird wiederum ihre gemeinsame Verwandtschaft mit G meinem Ohr unmittelbar fühlbar gegeben.

Die Gewöhnung an die sehr deutlich ausgesprochenen Tonverwandtschaften der harmonischen Musik hat einen unverkennbaren Einfluß auf unseren musikalischen Geschmack ausgeübt. Einstimmiger Gesang will uns nicht mehr recht gefallen, er erscheint uns leer und unvollkommen. Wenn auch nur das Klimpern einer Guitarre die Grundakkorde der Tonart hinzufügt und die harmonischen Verwandtschaften der Töne andeutet, fühlen wir uns dagegen befriedigt. Andererseits läßt sich nicht verkennen, daß eben wegen der deutlicheren Wahrnehmung der Tonverwandtschaften in der harmonischen Musik eine viel größere Mannigfaltigkeit musikalischer Beziehungen zwischen den Tönen gewonnen worden ist, weil auch ihre schwächeren Verwandtschaften benutzt werden können, und daß der Aufbau größerer musikalischer Sätze erst dadurch möglich wurde, weil der größere Bau auch stärkere Bänder fordert, um ihn zusammenzuhalten.

Die möglichst engste und einfachste Beziehung der Töne wird nun in der Durtonart gewonnen, wenn alle Töne der Melodie als Teile des Klanges teils der Tonika, teils ihrer oberen und unteren Quinte erscheinen. Dadurch werden alle Verwandtschaften der Töne zurückgeführt auf die engsten und nächsten Verwandtschaften, die es im musikalischen System überhaupt gibt, nämlich auf das Verwandtschaftsverhältnis der Quinte.

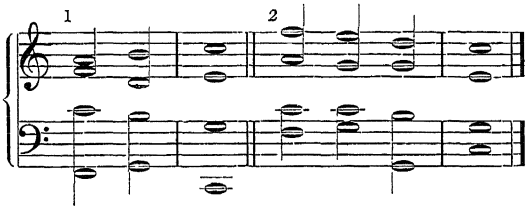
Die Beziehung des Akkordes der Oberquinte G zu dem der Tonika C ist einigermaßen verschieden von dem der Unterquinte F zum tonischen Akkord. Wenn ich von $C-\underline{E}-G$ fortschreite zu $G-\underline{H}-d$, so wende ich mich zu einem Klang hin, welcher schon in dem ersten Akkord mitgehört und dessen Eintritt daher wohl vorbereitet worden ist, während ich gleichzeitig durch diesen Schritt zu

denjenigen Tonstufen der Tonart hingelange, welche von der Tonika am entferntesten sind und nur eine indirekte Verwandtschaft zu dieser haben. Der genannte Übergang gibt also eine sehr entschiedene Fortbewegung in der Harmonie, die doch durchaus gesichert und gut motiviert ist. Umgekehrt ist es mit dem Schritt von $C-\underline{E}-G$ nach $F-\underline{A}-c$. Der F-Klang ist in dem ersten Akkord nicht vorbereitet, er muß neu gefunden und eingesetzt werden. Als richtig und eng verwandt rechtfertigt sich dieser Schritt eigentlich erst, wenn er gemacht worden ist, dadurch, daß man in dem F-Akkord lauter Töne findet, die der Tonika direkt verwandt sind. Es fehlt also im Übergang zu dem letzteren Akkord das Gefühl entschiedenen und sicheren Fortschrittes, welches in dem Übergang vom C- zum G-Dreiklang liegt. Dagegen kommt ihm eine Art weicherer und ruhigerer Schönheit zu, wohl weil er innerhalb der direkt verwandten Töne der Tonika bleibt. Bevorzugt aber wird namentlich in populärer Musik der erstgenannte Schritt nach der Oberquinte, die man deshalb auch die Dominante der Tonart nennt, und es bewegen sich viele einfachere Lieder und Tänze nur in dem Wechsel des tonischen und dominanten Akkordes. Daher denn auch die dafür eingerichtete gewöhnliche Harmonika beim Ausziehen des Blasebalges den Akkord der Tonika, beim Zusammendrücken den der Dominante zu geben pflegt. Die Unterquinte der Tonika heißt dagegen die Subdominante der Tonart. Ihr Akkord pflegt in den gewöhnlichen populären Melodien seltener einzutreten, gewöhnlich vor dem Schluß einmal, um das Gleichgewicht der Harmonie, welche sich von der Tonika meist nur nach der Seite der Dominante hinbewegt, auch nach der anderen Seite wieder herzustellen.

Wenn ein Absatz eines Tonstückes so endet, daß man von dem Dominantenakkord zum tonischen übergeht, und dieser den Schluß bildet, so nennen dies die Musiker einen .Ganzschluß. Man kehrt hierin von denjenigen Tönen, welche die schwächste Verwandtschaft innerhalb der Tonart zur Tonika haben, und ihr daher am fremdesten sind, zur Tonika zurück. Dies ist also eine entschieden ausgesprochene Bewegung von den entferntesten Teilen in den Mittelpunkt des Systemes zurück, wie sie am Schluß eintreten muß. Geht man aber von dem Akkord der Subdominante in den tonischen als Schlußakkord über, so nennt man dies einen Halbschluß (Plagalschluß). Die Töne

des Subdominantdreiklanges sind alle der Tonika direkt verwandt. In diesem Dreiklang befinden wir uns der Tonika schon sehr nahe, ehe wir in sie übergehen. Der Halbschluß entspricht einem ruhigeren Auslaufen des Tonsatzes in die Tonika zurück und hat weniger entschiedene Bewegung.

Im Ganzschluß hört man nur den Akkord der Dominante und Tonika; um das Gleichgewicht auch nach der Seite der Subdominante herzustellen, läßt man ihm noch den Subdominantenakkord vorausgehen, wie in 1 oder 2.



Diese Verbindung gibt erst den vollständigen Schluß, in welchem auch sämtliche Töne der Leiter wieder vorgeführt werden, so daß in ihm noch schließlich die ganze Tonart vollständig gesammelt und festgestellt ist.

In der Durtonart lassen sich, wie wir gesehen haben, die Forderungen der Tonalität mit denen harmonischer Vollstimmigkeit am leichtesten und vollständigsten vereinigen. Die Töne ihrer Leiter können harmonisch alle verwendet werden als Bestandteile des Klanges der Tonika, ihrer oberen und ihrer unteren Quinte, weil die genannten drei Haupttöne der Tonart auch zugleich Grundtöne von Durakkorden sind. Das ist nicht in gleichem Maße der Fall in den übrigen alten Tongeschlechtern.

1. Durgeschlecht:

$$\underbrace{f-\underline{a}-c}_{\text{Dur}}\overbrace{-\underline{e}-\underline{g}}^{\text{Dur}}\underbrace{-\underline{h}-d}_{\text{Dur.}}$$

2. Quartengeschlecht:

$$\underbrace{f-\underline{a}-c}_{\text{Dur}}\overbrace{-\underline{e}-\underline{g}}^{\text{Dur}}\underbrace{-\overline{b}-d}_{\text{Moll.}}$$

3. Septimengeschlecht:

$$\underbrace{f-\underline{a}-c}_{\text{Dur}}\overbrace{-\overline{es}-\underline{g}}^{\text{Moll}}\underbrace{-\overline{b}-d}_{\text{Moll}}$$

4. Terzengeschlecht (Moll):

$$\underbrace{f - \overline{as} - c}_{\text{Moll}} \quad \overbrace{- \overline{es} - g}^{\text{Moll}} \quad \underbrace{- \overline{b} - d}_{\text{Moll.}}$$

5. Sextengeschlecht:

$$\overbrace{b - \overline{des} -}^{\text{Moll}} \underbrace{f - as - c}_{\text{Moll}} \quad \overbrace{- \overline{es} - g}^{\text{Moll.}}$$

In den Mollakkorden liegt die Terz außerhalb des Klanges des Grundtones; sie kann nicht als Bestandteil dieses Klanges auftreten, und ihre Beziehung zu diesem ist deshalb nicht so unmittelbar verständlich wie die der Durterz, was namentlich im Schlußakkord hinderlich wird. Daher findet man denn auch die modernen populären Tanzstücke und Lieder so überwiegend in Durtonarten geschrieben, daß solche in Molltonarten fast nur noch seltene Ausnahmen bilden. Das Volk verlangt eben die klarste und einfachste Verständlichkeit in seiner Musik, und diese gibt die Durtonart. In der homophonen Musik existierte ein solches Übergewicht der Durtonart durchaus nicht. Eben deshalb finden wir die harmonische Begleitung der Choräle, welche in einer Durtonart geschrieben sind, schon im 16. Jahrhundert ziemlich vollständig ausgebildet, so daß viele derselben auch dem modern gebildeten musikalischen Gefühl vollständig entsprechen, während die harmonische Behandlung der Molltonart oder der übrigen Kirchentonarten in derselben Zeit noch sehr schwankend war und uns jetzt ziemlich fremdartig vorkommt.

In einem Durakkord $c - \underline{e} - g$ können wir g und $\underline{e}$ als Bestandteile des c-Klanges ansehen, aber weder c noch g als Bestandteile des $\underline{e}$-Klanges, und weder c noch $\underline{e}$ als solche des g-Klanges. Der Durakkord $c - \underline{e} - g$ ist also ganz eindeutig; er kann nur mit dem Klang des c verglichen werden, und deshalb ist c der herrschende Ton in dem Akkord, sein Grundton, oder nach Rameaus Bezeichnung sein Fundamentalbaß, und keiner der beiden anderen Töne des Akkordes hat das geringste Recht, diese Stelle einzunehmen.

Im Mollakkord $c - \overline{es} - g$ ist g ein Bestandteil des c-Klanges und des $\overline{es}$-Klanges. Weder es noch c kommt in einem der beiden anderen Klänge vor. Es ist also g jedenfalls ein abhängiger Ton. Dagegen kann man den genannten Mollakkord einmal als einen c-Klang be-

trachten, dem der fremde Ton $\overline{es}$ hinzugefügt ist, oder als einen $\overline{es}$-Klang, dem der Ton c hinzugefügt ist. Beide Fälle kommen vor. Es ist aber die erstere Deutung die gewöhnliche und vorwiegende. Denn wenn wir den Akkord als c-Klang betrachten, so finden wir in ihm das g als dritten Partialton, und nur statt des schwächeren fünften Partialtones $\underline{e}$ den fremden Ton $\overline{es}$. Fassen wir den Akkord aber als $\overline{es}$-Klang, so ist zwar der schwache fünfte Partialton durch das g richtig vertreten, statt des stärkeren dritten, welcher $\overline{b}$ sein sollte, finden wir aber den fremden Ton c. In der Regel finden wir deshalb den Mollakkord $c - \overline{es} - g$ in der modernen Musik so gebraucht, daß c als sein Grundton oder Fundamentalbaß behandelt ist, und der Akkord einen etwas veränderten oder getrübten c-Klang vertritt, aber es kommt der Akkord in der Lage $\overline{es} - g - c$ (besser $\overline{es} - g - \overline{c}$) auch in der $\overline{b}$-Durtonart vor, als Vertreter des Akkordes der Subdominante $\overline{es}$. Rameau nennt ihn dann den Akkord der großen Sexte, und betrachtet richtiger, als die neueren Theoretiker meist tun, $\overline{es}$ als seinen Fundamentalbaß.

In den Fällen nun, wo es darauf ankommt, die eine oder andere dieser Deutungen des Mollakkordes bestimmt festzustellen, kann man dies dadurch erreichen, daß man den Grundton teils durch seine tiefe Lage, teils durch die Zahl der auf ihn vereinigten Stimmen hervorhebt. Die tiefe Lage des Grundtones läßt diejenigen Töne, welche in seinen Klang hineinpassen, direkt als Partialtöne desselben erscheinen, während er selbst nicht einem viel höher liegenden anderen Ton als Partialton zugeeignet werden kann. Namentlich in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts, wo man zuerst anfing, Mollakkorde am Schluß zu gebrauchen, suchen die Komponisten die Tonika auch durch bedeutende Tonstärke vor ihrer Terz hervorzuheben. So findet man in Händels Oratorien regelmäßig, daß, wo er mit einem Mollakkord schließt, die meisten der hervortretenden Gesang- und Instrumentalstimmen auf die Tonika konzentriert werden, während die Mollterz entweder nur von einer dieser Stimmen, oder auch wohl nur von dem begleitenden Klavier bzw. der Orgel angegeben wird. Es sind bei ihm in den Molltonarten die Fälle viel seltener, wo nur zwei Stimmen die Tonika im Schlußakkord nehmen, eine deren Quinte, eine die Terz, als in den Durtonarten, wo diese Verteilung Regel ist.

Wenn der Mollakkord in seiner zweiten untergeordneten Bedeutung erscheint als $\overline{es} - g - c$ mit dem Grundton $\overline{es}$, wird das $\overline{es}$ als Grundton teils durch die Lage im Baß, teils durch seine nahe Verwandtschaft zur Tonika $\bar{b}$ hervorgehoben. Noch deutlicher bezeichnet die moderne Musik diese Deutung des Akkordes, indem sie auch $\bar{b}$ als Quinte von $\overline{es}$ hinzusetzt, so daß der Akkord dissonant wird in der Form $\overline{es} - g - \bar{b} - \bar{c}$.

Das Sträuben der älteren Komponisten, mit einem Mollakkord zu schließen, läßt sich teils durch die von falschen Kombinationstönen herrührende Trübung der Konsonanz dieses Akkordes erklären, teils aus dem eben besprochenen Umstand, wonach der Mollakkord den Klang der Tonika nicht rein wiedergibt, sondern mit anderen, diesem Klang fremden Tönen gemischt. Zu der Terz, welche in den Klang der Tonika nicht hineinpaßt, kommen noch die Kombinationstöne, welche es ebenfalls nicht tun. Solange das Gefühl der Tonalität nur in dem Sinn gefaßt wurde, daß ein bestimmter einzelner Ton oder Klang als verbindendes Zentrum der Tonart angesehen wurde, konnte man in der Tat keinen genügenden Schluß bilden, wenn dieser Schluß nicht einfach und rein den Klang der Tonika darstellte und nichts diesem Klang Fremdes enthielt. Es war erst eine weitere Ausbildung des musikalischen Gefühles für die selbständige Bedeutung der Akkorde in der Tonart nötig, ehe der Mollakkord, trotz seiner dem Klang der Tonika fremden Bestandteile, als berechtigt im Schlußakkord erscheinen konnte.

Hauptmann[1]) gibt eine andere Erklärung für die Vermeidung des Mollakkordes im Schluß. Er behauptet, ehe man Septimenakkorde gebraucht habe, sei keine Stimme dagewesen, welche passend in die kleine Terz übergehen konnte. Wenn nämlich die Schlußkadenz aus den Akkorden $G - \underline{H} - D$ und $C - \overline{Es} - G$ besteht, hätte nur das D des ersten Akkordes in das $\overline{Es}$ des zweiten melodiös fortschreiten können; dies hätte aber wie der Fortschritt des Leittones D in der $\overline{Es}$-Durtonart auf seinen Grundton $\overline{Es}$ geklungen, und das Gefühl von $\overline{Es}$-Dur erweckt. Wenn wir auch zugeben wollen, daß ein solches Leittonverhältnis die Aufmerksamkeit des Hörers anf die betreffenden beiden Töne besonders hinleitet und in gewissem Grade das Gefühl

[1]) Harmonik und Metrik. Leipzig 1853. S. 216.

der Tonart stören könnte, so hätten sich doch wohl auch ohne Septimenakkorde mancherlei Formen der Stimmführung durch Dissonanzen hindurch finden lassen, um zu der kleinen Terz des Schlußakkordes hinzugelangen, wenn diese Bedürfnis gewesen wäre. Namentlich ist in dem sonst so häufig gebrauchten Plagalschluß

$$c - \bar{es} - g - c$$
$$F - f - \bar{as} - c$$
$$C - \bar{es} - g - c$$

die Überleitung der Quarte f zur Mollterz $\bar{es}$ ohne allen Anstoß. Und vollends als man die Septimenakkorde zu gebrauchen anfing, hätte sich doch die Septime F des Akkordes $G - \underline{H} - D - F$ notwendig in die Terz $\underline{Es}$ des Schlußakkordes auflösen sollen. Aber im Gegenteil, wo sie in Sätzen aus dem 15. Jahrhundert vorkommt [1]), läßt man sie entweder aufsteigen in die Quinte des Schlußakkordes, oder absteigen zur großen Terz E, wie es bis auf Bachs Zeiten blieb.

Wir haben im dreizehnten Abschnitt die neuere harmonische Musik der mittelalterlichen polyphonen gegenüber dadurch charakterisiert, daß sie das Gefühl für die selbständige Bedeutung der Akkorde entwickelt habe. In der Tat finden wir auch schon bei Palestrina, Gabrieli, noch mehr bei Monteverde und den ersten Opernkomponisten die verschiedenen Abstufungen des Wohlklanges der Akkorde sorgfältig für die Zwecke des Ausdruckes benutzt. Aber es fehlt bei den genannten Meistern noch fast jede Rücksicht auf die Verwandtschaft der einander folgenden Akkorde unter sich. Diese folgen einander oft in ganz unzusammenhängenden Sprüngen, und das einzige Band, welches sie verbindet, ist die Tonart, aus deren Tonstufen sie alle gebildet sind.

Die Umänderung nun, welche vom 16. bis zum Anfang des 18. Jahrhunderts vor sich ging, kann man, glaube ich, so definieren, daß sich das Gefühl für die selbständige Verwandtschaft der Akkorde untereinander ausbildete, und daß nun auch für die Reihe konsonanter Akkorde, welche die Tonart zuläßt, ein gemeinsam verknüpfendes Zentrum in dem tonischen Akkord gesucht und gefunden wurde. Es wiederholte sich hier für die Akkorde dasselbe Streben, welches

[1]) Siehe ein Beispiel von Anton Brumel bei Forkel, Geschichte der Musik 2, 647. — Ein anderes mit Plagalschluß von Josquin, ebenda S. 550, wo die Stimmführung ohne Schwierigkeit zur Mollterz gehen könnte.

in der Konstruktion der Tonleitern sich früher geltend gemacht hatte. Auch zwischen den Tonstufen der Leiter hatte man Verwandtschaft gesucht; erst eine kettenweise, dann eine solche, welche auf ein einziges Zentrum, die Tonika, zusammenlief.

Direkt verwandt nenne ich zwei Akkorde, welche einen oder mehrere Töne gemein haben.

Im zweiten Grade verwandt sind Akkorde, welche beide mit demselben konsonanten Akkord direkt verwandt sind.

Also $c — \underline{e} — g$ und $g — \underline{h} — d$ sind direkt verwandt, ebenso $c — \underline{e} — g$ und $\underline{a} — c — \underline{e}$; aber $g — \underline{h} — d$ und $\underline{a} — c — \underline{e}$ sind im zweiten Grade verwandt.

Wenn zwei Töne zweier Akkorde identisch sind, ist ihre Verwandtschaft eine engere, als wenn nur ein Ton es ist. Also sind $c — \underline{e} — g$ und $\underline{a} — c — \underline{e}$ enger verwandt, als $c — \underline{e} — g$ und $g — \underline{h} — d$.

Als tonischer Akkord innerhalb eines Tongeschlechtes kann natürlich immer nur einer gewählt werden, der mehr oder weniger gut den Klang der Tonika darstellt, also derjenige Dur- oder Mollakkord, dessen Grundton die Tonika ist. Denn ebenso wie die Tonika als verbindendes Zentrum der Töne in einer normal gebildeten einstimmigen Melodie auf dem ersten akzentuierten Taktteil des Anfanges und am Schluß gehört werden muß, so daß die Melodie von ihr ausgeht und zu ihr zurückkehrt, so gilt dasselbe auch für den tonischen Akkord innerhalb der Akkordkette. Wir verlangen an den beiden genannten Stellen des Satzes nicht bloß die Tonika zu hören, diese von einem beliebigen Akkord begleitet, sondern wir lassen an beiden Orten als Begleitung der Tonika durchaus nur den tonischen Akkord zu, dessen Grundton die Tonika ist. Noch im 16. Jahrhundert war es anders, wie das oben S. 407 zitierte Beispiel von Palestrina zeigt.

Wenn der tonische Akkord ein Durakkord ist, so vereinigt sich die Herrschaft der Tonika über die Töne ohne alle Schwierigkeit mit den Bedingungen der Herrschaft des tonischen Akkordes über die Akkorde. Denn indem das Stück mit dem tonischen Akkord beginnt und endet, beginnt und endet es zugleich mit dem reinen unvermischten Klang der Tonika. Wenn der tonische Akkord dagegen ein Mollakkord ist, so läßt sich nicht so vollständig allen Bedingungen zugleich genügen. Man muß etwas von der Strenge der

Tonalität nachlassen, um die Mollterz des tonischen Akkordes im Anfang und Schluß zulassen zu können. Wir finden noch bei Sebastian Bach im Anfang des 18. Jahrhunderts den Mollakkord zwar am Ende seiner Präludien, weil diese nur einleitende Stücke waren, aber nicht am Ende der Fugen, der Choräle und anderer endgültig schließender Sätze gebraucht. Bei Händel und selbst in den kirchlichen Kompositionen von Mozart ist der Schluß mit dem Mollakkord abwechselnd gebraucht mit solchen Schlüssen, welche entweder gar keine Terz oder die Durterz enthalten. Und bei dem letztgenannten Komponisten kann man das auch keineswegs für eine äußerliche Nachahmung der alten Sitte erklären. Denn es ist immer wesentlich der Ausdruck des Stückes beachtet. Wenn am Schluß eines Satzes, der in einer Molltonart sich bewegt, zuletzt ein Durakkord eintritt, so klingt dies immer wie eine plötzliche und unerwartete Aufhellung des trüben Charakters der Molltonart; ein solcher Schluß erscheint nach der Sorge, dem Kummer, der Unruhe des Mollsatzes erheiternd, aufklärend und versöhnend. Also wo die Bitte um Frieden für die Entschlafenen in den Worten endet: „Et lux perpetua luceat eis", oder das *Confutatis maledictis* mit der Bitte schließt:

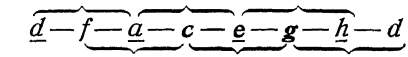
Oro supplex et acclinis,
Cor contritum quasi cinis,
Gere curam mei finis,

paßt ein Schluß mit dem Durakkord. Ein solcher hat aber freilich für unser jetziges musikalisches Gefühl immer etwas Überraschendes, wenn auch sein Einsatz bald eine wunderbare Schönheit und Feierlichkeit zu verbreiten pflegt, bald wie ein Hoffnungsstrahl in das Dunkel tiefster Zerknirschung hineinbricht. Bleibt die Unruhe bis zuletzt bestehen, wie in dem *Dies irae* des Requiem von Mozart, so endet auch passender der Mollakkord, in welchem selbst noch ein ungelöster Zwiespalt liegt, wenn er als Schlußakkord gebraucht wird. Kirchliche Sätze von unentschiedenerem Charakter pflegt Mozart mit einem Akkord ohne Terz zu enden. Ähnliche Beispiele findet man in Menge bei Händel. Beiden Meistern also, obgleich sie ganz auf dem Standpunkt des modernen musikalischen Gefühles feststanden, und gleichsam die letzte Hand an den Ausbau des modernen Tonsystemes gelegt haben, war das Gefühl nicht ganz fremd, welches die älteren Musiker verhindert hatte, die Mollterz der Tonika im Schluß-

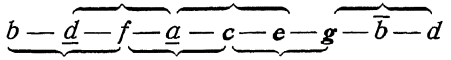
akkord zu brauchen. Aber sie machten daraus keine feste Regel, sondern richteten sich nach dem Ausdruck und Charakter des Satzes und nach dem Sinn der Worte, mit denen sie zu schließen hatten.

Zu einem künstlerisch zusammenhängenden Harmoniegewebe werden diejenigen Tongeschlechter am meisten geeignet sein, welche die größte Zahl unter sich und mit dem tonischen Akkord verwandter konsonanter Akkorde liefern können. Da alle konsonanten Akkorde in engster Lage und einfachster Form Dreiklänge sind, welche aus einer großen und einer kleinen Terz zusammengesetzt sind, so finden wir sämtliche konsonante Akkorde einer Tonart einfach dadurch, daß wir alle ihre Tonstufen nach Terzen ordnen, was in folgender Übersicht geschehen ist. Die Klammern fassen die einzelnen konsonanten Dreiklänge zusammen; der tonische Akkord ist durch stärkeren Druck ausgezeichnet.

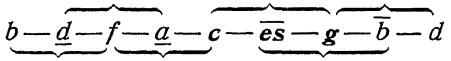
1. Durgeschlecht:



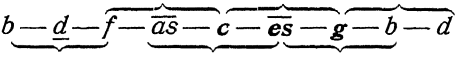
2. Quartengeschlecht:



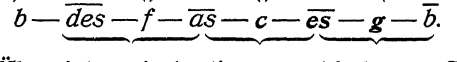
3. Septimengeschlecht:



4. Terzengeschlecht:



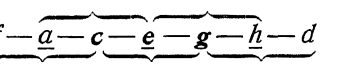
5. Sextengeschlecht:



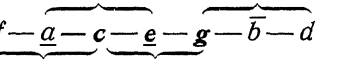
In dieser Übersicht sind die verschiedenen Stimmungen der Sekunde und Septime der Tonart berücksichtigt, welche wir in der Konstruktion der Tonleitern für die homophone Musik gefunden haben. Wir bemerken nun aber hier, daß schon die dem tonischen Akkord direkt verwandten Akkorde jeder Tonart sämtliche Tonstufen der Leiter enthalten, mit Ausnahme des Sextengeschlechtes. Sekunde und Septime der Tonika kommen erstens im *g*-Akkord vor, der dem tonischen direkt verwandt ist, und zweitens in Akkorden,

welche *F* enthalten, die aber dem tonischen nicht direkt verwandt sind. Dadurch erhalten in der harmonischen Musik die der Dominante verwandten Fülltöne der Leiter ein bedeutendes Übergewicht über die der Subdominante verwandten. Wo direkte Verwandtschaften der Akkorde zur Bestimmung der Tonstufen genügen, werden wir diese den indirekten vorziehen müssen. Beschränken wir uns also auf diejenigen Akkorde, die dem tonischen direkt verwandt sind, so erhalten wir folgende Übersicht der Tongeschlechter:

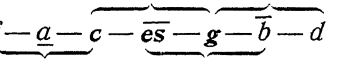
1. Durgeschlecht:



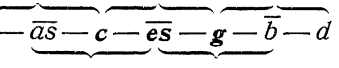
2. Quartengeschlecht:



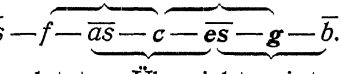
3. Septimengeschlecht:



4. Terzengeschlecht:



5. Sextengeschlecht:



Ein Blick auf diese letztere Übersicht zeigt, daß die vollständigsten und geschlossensten Akkordreihen dem Durgeschlecht und dem Terzengeschlecht (Moll) zukommen, so daß für die harmonische Behandlung diese beiden entschieden brauchbarer sind als die übrigen Geschlechter. Dies ist auch der Umstand, auf welchem ihre Bevorzugung in der modernen harmonischen Musik beruht.

Dadurch wird nun auch die Stimmung der Fülltöne der Leiter, wenigstens für die ersten vier Geschlechter, endgültig festgestellt. Hauptmann betrachtet, wie ich meine, mit Recht als wesentlichen Bestandteil der *C*-Dur- und *C*-Molltonleiter nur den Ton *D*, welcher mit *F* eine unreine Terz bildet, so daß der Akkord $D-F-\underline{A}$ als dissonant betrachtet werden muß. Dieser Akkord, in der genannten Stimmung ausgeführt, ist in der Tat sehr entschieden dissonant. Dagegen läßt Hauptmann eine nach der Unterdominantseite übergreifende Durtonart zu, welche statt *D* den Ton $\underline{D}$ enthält. Ich

halte diese Art der Darstellung für einen sehr glücklich gewählten Ausdruck des wahren Sachverhältnisses. Wenn der konsonante Akkord $\underline{D}-F-\underline{A}$ in einem Satz auftritt, kann man nicht unmittelbar und ohne Zwischenstufe in den tonischen Akkord $C-\underline{E}-G$ zurückkehren. Es würde das immer ein unvermittelter harmonischer Sprung sein. Es ist also ein richtiger Ausdruck der Sachlage, wenn dies als eine beginnende Modulation über die Grenzen der C-Durtonart, über die Grenzen der direkten Verwandtschaft ihres tonischen Akkordes hinaus betrachtet wird. In der Molltonart würde dem die Modulation in den Akkord $\overline{Des}-F-\overline{As}$ entsprechen. Freilich wird in der modernen temperierten Stimmung der konsonante Akkord $\underline{D}-F-\underline{A}$ von dem dissonanten $D-F-\underline{A}$ nicht unterschieden, und deshalb ist der Sinn für diesen von Hauptmann gemachten Unterschied auch nicht deutlich ausgebildet.

Was den anderen zweideutigen Füllton $\bar{b}$ betrifft, welcher in den Akkorden $\overline{es}-g-\bar{b}$ und $g-\bar{b}-d$ vorkommen kann, so ist schon im vorigen Abschnitt erwähnt, daß selbst in der homophonen Musik an seine Stelle in aufsteigender Bewegung fast immer $\underline{h}$ einzutreten pflegt. Durch harmonische Rücksichten wird der Gebrauch von $\underline{h}$ unabhängig von der Art der melodischen Bewegung ebenfalls begünstigt. Es ist schon vorher angeführt worden, daß die beiden schwach verwandten Töne der Leiter, wenn sie als Bestandteile des Klanges der Dominante auftreten, in ganz enge Beziehung zur Tonika gesetzt werden. Das kann aber nur mit den Klängen des Durakkordes $g-h-d$, nicht mit denen des Mollakkordes $g-\bar{b}-d$ geschehen. An sich sind die Töne $\bar{b}$ und b ebenso nahe mit c verwandt als h und d. Aber indem wir die letzteren als Teile des Klanges g erscheinen lassen, binden wir sie durch dieselbe nahe Verwandtschaft an c, welche g hat. Deshalb pflegt man in der neueren Musik überall, wo der Ton $\bar{b}$ in c-Moll als Bestandteil des Dominantdreiklanges oder eines ihn vertretenden dissonanten Akkordes vorkommt, ihn in $\underline{h}$ zu verwandeln, und je nach dem Gang der Melodie und Harmonie bald $\bar{b}$, bald $\underline{h}$, meistens aber das letztere, zu gebrauchen, wie ich dies schon oben bei der Konstruktion der Molltonleitern bemerkt habe. Durch diesen systematischen Gebrauch der großen Septime $\underline{h}$ der Tonart statt der kleinen b unterscheidet sich nun die neuere Molltonart von der älteren hypodorischen oder dem

Terzengeschlecht. Es wird also auch hier wiederum etwas von der Konsequenz der Tonleiter geopfert, um die Harmonie fester zu binden.

Die Verkettung der konsonanten Akkorde des Terzengeschlechtes wird zwar etwas weniger reich, wenn wir durch die Einführung des Tones $\underline{h}$ das Terzengeschlecht in unser Mollgeschlecht umbilden. Statt der Kette

$$\overbrace{f-\overline{as}-c-\overline{es}-g}-\overline{b}-d$$

haben wir im Moll folgende:

$$\overbrace{f-\overline{as}-c-\overline{es}-g}-\underline{h}-d$$

mit einem Dreiklang weniger. Indessen bleibt der Wechsel zwischen dem Ton $\overline{b}$ und $\underline{h}$ immer noch frei.

Die Einführung des Leittones $\underline{h}$ in die c-Molltonleiter brachte für den Ganzschluß in dieser Tonart eine neue Schwierigkeit hervor. Wenn die Akkorde $g-\underline{h}-d$ und $c-\overline{es}-g$ sich folgen, ist der erstere ein Durakkord von vollem Wohlklang, der letztere ein Mollakkord von gedämpftem Wohlklang, was durch den Kontrast mit dem vorhergehenden Durakkord noch mehr hervorgehoben wird. Gerade im Schlußakkord aber ist volle Konsonanz ein wesentliches Bedürfnis, damit sich das Gefühl des Hörers in dieser vollständig beruhigen kann. Es mußten deshalb erst die Septimenakkorde erfunden sein, durch welche man den Dominantdreiklang in einen dissonanten Akkord verwandelt, ehe ein derartiger Tonschluß zulässig schien.

Es geht aus der gegebenen Darstellung hervor, daß, sobald man eine enge Verkettung der der Tonart eigentümlichen Akkorde nach demselben Prinzip erstrebt, nach welchem die Verkettung der Töne der Tonleiter hergestellt ist, sobald man also verlangt, daß alle konsonanten Dreiklänge des Harmoniegewebes in derselben Weise einem unter ihnen, dem tonischen Dreiklang, verwandt sein sollen, wie alle Klänge der Tonleiter der Tonika verwandt sind, daß dann die Vereinigung beider Forderungen auf nur zwei Tongeschlechter führt, welche die Bedingungen am vollkommensten erfüllen, nämlich das Dur- und das Mollgeschlecht.

Das Durgeschlecht erfüllt die Forderungen der Akkordverwandtschaft und der tonalen Verwandtschaft am vollständigsten. Es hat vier dem tonischen Akkord unmittelbar verwandte Dreiklänge:

$$\overbrace{f-\underline{a}-c-e-g}-\underline{h}-d.$$

Man kann seine Harmonisierung so führen — und dies geschieht, wie gesagt, namentlich in populären Stücken, die leicht verständlich sein müssen —, daß alle Töne als Teile der drei Durakkorde erscheinen, welche das System enthält, des Durakkordes der Tonika, der Dominante und der Subdominante. Solche Durakkorde mit tief liegendem Grundton erscheinen dem Ohr als Verstärkungen des Klanges der Tonika, der Dominante und der Subdominante, welche drei Klänge wiederum durch engste Quintenverwandtschaft miteinander verbunden sind. So kann in diesem Geschlecht alles auf die allerengsten und nächsten Verwandtschaften reduziert werden, welche es in der Musik gibt. Und da nun auch der tonische Akkord des Durgeschlechtes unmittelbar und vollständig den Klang der Tonika repräsentiert, so fallen die beiden Forderungen der durchgehenden Herrschaft der Tonika und des tonischen Akkordes in eine zusammen, ohne einen Widerspruch zuzulassen, und ohne daß Veränderungen der Tonleiter dabei nötig sind.

Das Durgeschlecht hat also den Charakter vollständigster melodischer und harmonischer Konsequenz, größter Einfachheit und Klarheit aller Verhältnisse. Dazu kommt nun noch, daß sich die Durakkorde, die in ihm die herrschenden sind, durch vollen und ungetrübten Wohlklang auszeichnen, wenn man solche Umlagerungen derselben wählt, in welchen sie keine ungehörigen Kombinationstöne geben.

Die Durtonleiter ist rein diatonisch und mit dem aufwärts steigenden Leitton der großen Septime versehen, wodurch auch der am schwächsten verwandte Ton der Leiter zur Tonika in nahe melodische Beziehung gesetzt wird.

An die herrschenden Durakkorde schließen sich noch zwei dem tonischen eng verwandte Mollakkorde innerhalb der Grenzen der Tonart an, welche man benutzen kann, um in die Reihe der Durakkorde Abwechselung zu bringen.

Das Mollgeschlecht steht in vielen Beziehungen hinter dem Dur zurück. Die Akkordkette seiner modernen Form ist:

$$\underbrace{f}\,\overbrace{\underbrace{as}\,\underbrace{c}\,\overline{es}}\,\underbrace{g}\,\overbrace{\underline{h}\,d}.$$

Die Mollakkorde repräsentieren nicht so rein und einfach den Klang ihres Grundtones, wie die Durakkorde, vielmehr fällt ihre Terz aus diesem Klang heraus. Nur der Dominantdreiklang ist ein Dur-

akkord, welcher die beiden Ausfüllungstöne der Leiter enthält. Diese beiden werden deshalb, wo sie als Bestandteile des Dominantdreiklanges, also als Bestandteile des Klanges der Dominante erscheinen, durch enge Quintenverwandtschaft an die Tonika gefesselt. Dagegen repräsentieren der Dreiklang der Tonika und der Subdominante nicht einfach die Klänge dieser Noten, sondern sind von kleinen Terzen begleitet, welche nicht auf enge Quintenverwandtschaft zur Tonika reduziert werden können. Die Verkettung der Töne mit der Tonika läßt sich also im Mollgeschlecht durch die Harmonisierung nicht auf so enge Verwandtschaften zurückführen wie im Durgeschlecht.

Die Forderung der Tonalität läßt sich mit der Herrschaft des tonischen Akkordes nicht so einfach vereinigen wie im Durgeschlecht. Wenn ein Satz mit einem Mollakkord schließt, bleibt neben dem Klang der Tonika noch ein zweiter Klang stehen, der nicht ein Teil von jenem ist. Daher die lang dauernde Unsicherheit der Tonsetzer betreffs der Zulässigkeit eines Mollakkordes am Schluß.

Die vorherrschenden Mollakkorde haben nicht die reine Klarheit und den ungetrübten Wohlklang der Durakkorde, weil sie von Kombinationstönen begleitet sind, welche nicht in den Akkord hineinpassen.

Die Molltonleiter enthält den für den Sänger schwer auszuführenden Sprung $\overline{as} - \underline{h}$, dessen Weite größer als die ganzen Töne der diatonischen Leiter ist, und dem Zahlenverhältnis $\frac{75}{64}$ entspricht. Um die Molltonleiter melodisch zu machen, muß sie im Aufsteigen und Absteigen verschiedene Veränderungen erleiden, welche im vorigen Abschnitt schon besprochen sind.

Das Molltonsystem zeigt daher nicht dieselbe einfache, klare und leicht verständliche Konsequenz wie das Durgeschlecht; es ist entstanden gleichsam durch ein Kompromiß zwischen den verschiedenen Anforderungen, die durch das Gesetz der Tonalität und durch die Verkettung des Harmoniegewebes gestellt waren. Es ist deshalb auch viel veränderlicher, viel mehr zu Modulationen in andere Tongeschlechter geneigt.

Diese Behauptung, daß das Mollsystem weniger vollkommen konsequent sei, als das Dursystem, wird bei vielen neueren musikalischen Theoretikern Anstoß erregen, ebenso wie die oben von mir

und vor mir schon von anderen Physikern aufgestellte Behauptung, daß der Wohlklang der Molldreiklänge im allgemeinen gedämpfter sei, als der der Durdreiklänge. Es finden sich in neueren Büchern über Harmonielehre viele eifrige Versicherungen des Gegenteiles. Aber ich glaube, daß die Geschichte der Musik, die äußerst langsame und vorsichtige Entwickelung des Mollsystemes im 16. und 17. Jahrhundert, der vorsichtige Gebrauch des Mollschlusses bei Händel, das teilweise Vermeiden desselben auch noch bei Mozart, daß alle diese Umstände keinen Zweifel darüber lassen, wie das künstlerische Gefühl der großen Tonsetzer für unsere Schlußfolgerungen sprach. Dazu kommt dann auch das Wechseln mit der großen und kleinen Septime, großen und kleinen Sexte der Tonart, die schnell eintretenden, schnell wechselnden Modulationen, endlich sehr entscheidend auch der Gebrauch des Volkes. Zu Volksmelodien können nur solche von klaren, durchsichtigen Verhältnissen werden. Man sehe Sammlungen von Liedern durch, welche gegenwärtig bei denjenigen Klassen der abendländischen Völker beliebt sind, die harmonische Musik oft zu hören Gelegenheit haben, also bei Studenten, Soldaten, Handwerkern. Man wird auf hundert Lieder in Dur vielleicht eines oder zwei in Moll finden, und diese sind dann meist alte Volksmelodien, die noch aus der Zeit des überwiegend einstimmigen Gesanges herübergekommen sind. Charakteristisch ist es auch, daß, wie mir ein erfahrener Gesanglehrer versichert, Schüler von mäßigem musikalischen Talent viel schwerer die Mollterz treffen lernen, als die Durterz.

Auch glaube ich nicht, daß in diesem Resultat eine Herabsetzung des Mollsystemes liege. Das Dursystem ist für alle fertigen, in sich klaren Stimmungen gut geeignet, für kräftig entschlossene, wie sanfte oder süße, selbst für trauernde, wenn die Trauer in den Zustand schwärmerischer weicher Sehnsucht übergegangen ist. Aber es paßt durchaus nicht für unklare, trübe, unfertige Stimmungen, oder für den Ausdruck des Unheimlichen, des Wüsten, Rätselhaften oder Mystischen, des Rohen, der künstlerischen Schönheit Widerstrebenden, und gerade für solche brauchen wir das Mollsystem mit seinen verschleierten Wohlklängen, seiner veränderlichen Tonleiter, seinen leicht ausweichenden Modulationen, und dem weniger deutlich in das Gehör fallenden Prinzip seines Baues. Das Dursystem würde

eine unpassende Form für solchen Ausdruck sein, und deshalb hat das Mollsystem neben ihm seine volle künstlerische Berechtigung.

Die harmonischen Eigentümlichkeiten der modernen Tonarten treten am besten hervor, wenn wir sie mit der Harmonisierung der übrigen alten Tongeschlechter vergleichen.

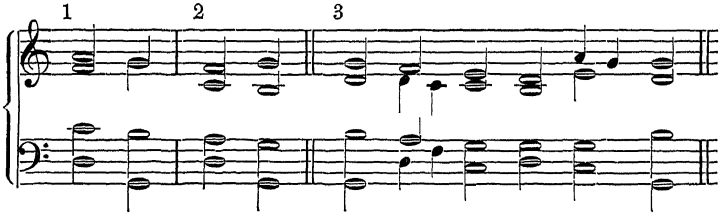
Unter den melodischen Tongeschlechtern ist das lydische der Griechen (ionische Kirchentonart) mit unserem Dur übereinstimmend, das einzige, welches in der großen Septime einen aufsteigenden Leitton hat. Die vier übrigen haben ihrer ursprünglichen Natur nach kleine Septimen, die man schon in den späteren Zeiten des Mittelalters anfing, in große Septimen zu verwandeln, um die der Tonika schwach verwandte Septime gerade im Schluß als Leitton fester an diese zu ketten.

Was zunächst das Quartengeschlecht (Ionisch der Griechen, mixolydische Kirchentonart) betrifft, so unterscheidet sich dieses vom Dur nur durch die kleine Septime; verwandelt man diese in die große, so verschwindet jeder Unterschied zwischen beiden. Wenn die Tonika *g* ist, kann der tonische Akkord, ein Durakkord, nur *g — h — d* sein, und die Akkordkette der unveränderten Tonart würde folgende sein müssen:

$$\overbrace{c — \underbrace{e — g — h}} — \underbrace{d — f — a.}$$

Versucht man einen Ganzschluß in dieser Tonart zu bilden, wie in den folgenden Beispielen unter 1 und 2, so klingt ein solcher matt, weil ihm der Leitton fehlt, selbst wenn man den Dominantakkord zum Septimenakkord erweitert.

Quartengeschlecht.



Das zweite Beispiel, wo der Leitton in der Oberstimme liegt, klingt noch matter als das erste, wo er sich mehr versteckt. Das *f* ist in beiden ein unsicher klingender Ton. Er ist nicht nahe genug

verwandt mit der Tonika, nicht Teil des Klanges der Dominante *d*; nicht nahe genug der Tonika, um Leitton zu sein, und das Vorwärtsdrängen des Leittones zur Tonika fehlt ihm. Die älteren Tonsetzer schlossen deshalb Sätze im Quartengeschlecht, wenn sie es auch im Schluß vom Durgeschlecht unterschieden halten wollten, mit dem halben oder plagalen Schluß, wie ich ihn im Beispiel 3 angewendet habe. Diesem fehlt an und für sich schon die entschiedene Bewegung des Ganzschlusses, und der Mangel an Bewegung, den dort der fehlende Leitton bedingte, fällt hier nicht auf.

Im Verlauf eines Satzes, der diesem Geschlecht angehört, kann bei aufsteigender Bewegung der Leitton allerdings oft angewendet werden, wenn dazwischen bei absteigender Bewegung die kleine Septime hinreichend oft eintritt. Aber gerade im Schluß ist es mißlich, eine wesentliche Eigenschaft der Tonart zu verändern. Sätze im Quartengeschlecht klingen also wie Sätze in einer Durtonart, welche eine ausgesprochene Neigung haben, in die Durtonart der Unterdominante hinüber zu modulieren. Der Übergang zur Subdominante erscheint aus dem schon früher angegebenen Grund weniger aktiv, als der zur Oberdominante. Dann fehlt diesem Tongeschlecht auch in seinen Schlüssen eine bestimmt ausgesprochene Bewegung, während Durakkorde, zu denen auch der tonische gehört, in ihm vorherrschen mit ihrem volleren Wohlklang. Das Quartengeschlecht muß demgemäß weich und wohlklingend sein wie Dur, aber es fehlt ihm an den kräftigeren Bewegungsimpulsen des Durgeschlechtes. Damit stimmt auch die von Winterfeld[1]) gegebene Charakterisierung. Er bezeichnet die ionische Kirchentonart (Dur) als eine Tonreihe, „die in sich abgeschlossen, auf den hell und heiter hinausstrahlenden harten Dreiklang, eine durch die Natur selber hinklingende, befriedigende Verschmelzung verschiedener Töne gegründet, auch das Gepräge heiteren, frohen Genügens trägt". Dagegen sei die mixolydische Kirchentonart (Quartengeschlecht) eine Tonreihe, „in der alles wieder hinklingt, hinstrebt zu dem Ursprung, aus dem ihr Grundton erwuchs" (d. i. zur Durtonart der Subdominante), „durch die ein Zug der Sehnsucht hingeht neben jenem heiteren Genügen, dem christlichen Sehnen gleich nach geistlicher Wiedergeburt, Er-

[1]) Johannes Gabrieli und sein Zeitalter 1, 87.

lösung, Rückkehr einer früheren Unschuld, gemildert aber durch die Seligkeit der Liebe und des Glaubens".

Das Septimengeschlecht (Phrygisch der Griechen, dorische Kirchentonart) hat über der Tonika *d* einen Mollakkord als tonischen

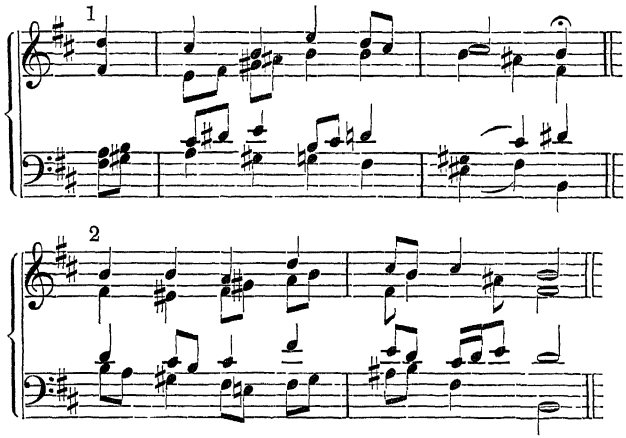
$$\overbrace{g - \underline{h} - d}\underbrace{- \bar{f} - a}\overbrace{- \bar{c} - e},$$

ebenso ursprünglich über der Dominante *a*, dagegen über der Subdominante *g* einen Durakkord, durch welchen letzteren es sich vom Terzengeschlecht (Äolisch) unterscheidet. Beide genannte Geschlechter können, ohne ihren Charakter zu verwischen, die kleine Septime zum Leitton erhöhen, und aus beiden ist unsere Molltonart zusammengeschmolzen. Die aufsteigende Molltonleiter gehört dem Septimengeschlecht an, dem man den Leitton gegeben hat, die absteigende dem Terzengeschlecht. Gibt man aber dem Septimengeschlecht den Leitton, so wird seine Akkordkette reduziert auf die drei wesentlichen Dreiklänge der Tonart:

$$\overbrace{g - \underline{h} - d}\underbrace{- \bar{f} - a}\overbrace{- \underline{cis} - e}.$$

Diese Tonart hat im ganzen den Charakter der Molltonart, nur daß der Übergang auf den Akkord der Subdominante mehr aufhellend wirkt, als in der normalen Molltonart, in welcher dieser Akkord selbst ein Mollakkord ist. Wenn man aber die vollständige Kadenz bildet, bekommen beide Dominanten der Tonart Durakkorde, dazwischen bleibt der Akkord der Tonika allein als Mollakkord stehen. Aber im Schluß gerade macht es eine ungünstige Wirkung, wenn der Schlußakkord einen gedämpfteren Wohlklang hat als die beiden anderen Hauptakkorde der Tonart. Man muß auf diese scharfe Dissonanzen legen, wenn dadurch nicht ein Mißverhältnis entstehen soll. Bildet man aber nach Art der älteren Tonsetzer auch den Schlußakkord in Dur, so ist der Charakter der Tonart in der Kadenz ganz in Dur verwandelt. Oder da in dem System der Kirchentonarten das *H* immer in *B* verwandelt werden kann, was den Subdominantenakkord des Quartengeschlechtes in einen Mollakkord verwandelt, so kann man dadurch das Septimengeschlecht in seiner Kadenz vor der Verwechselung mit Dur schützen, dann fällt es aber wiederum ganz mit dem alten Mollschluß zusammen.

Sebastian Bach bringt in der Kadenz dieses Tongeschlechtes die große Sexte der Tonika, die ihm charakteristisch ist, in andere Akkordverbindungen, und vermeidet so den Durdreiklang der Subdominante. Sehr gewöhnlich bringt er die große Sexte als Quinte des Septimenakkordes auf der Sekunde der Tonart an, wie in den nachstehenden Beispielen. Nr. 1 ist das Ende des Chorales „Was mein Gott will, das gescheh' allzeit" in der Matthäus-Passion. Nr. 2 ist das Ende des Hymnus *Veni redemptor gentium,* am Schluß der Kantate: „Schwingt freudig Euch empor zu den erhabenen Sternen". In beiden Tonika *h*, große Sexte *gis*:



Ähnliche Beispiele finden sich noch viele; er geht offenbar einem regelmäßigen Schluß aus dem Wege.

Die neueren Komponisten, wenn sie ein zwischen Dur und Moll liegendes Tongeschlecht, wenigstens für einzelne melodische Phrasen oder Kadenzen, brauchen wollen, haben es meist vorgezogen, den einen Mollakkord des Geschlechtes nicht der Tonika, sondern der Subdominante zu geben. Hauptmann nennt dieses die Moll-Durtonart; ihre Akkordkette ist folgende:

$$\underbrace{f - \overline{as} - c}\ \overbrace{-\underbrace{e - g}\ - h}\ - d.$$

Hier haben wir einen Leitton im Dominantenakkord, einen voll ausklingenden Schluß im Durakkord der Tonika, und der Anklang nach Moll hin kann im Subdominantenakkord ungestört stehen bleiben. Für die Harmonisierung ist dieses Moll-Durgeschlecht jedenfalls viel

geschickter als das alte Septimengeschlecht. Aber für den homophonen Gesang paßt es wieder nicht, ohne in aufsteigender Leiter $\overline{as}$ in $\underline{a}$ zu verwandeln, weil sonst der komplizierte Sprung $\overline{as} - \underline{h}$ zu machen ist. Die alten Geschlechter sind aus dem homophonen Gesang hergeleitet, für welchen das Septimengeschlecht vollkommen gut paßt, wie es ja auch jetzt noch unsere aufsteigende Molltonleiter bildet.

Während also das Septimengeschlecht in unbestimmter Weise zwischen Dur und Moll einherschwankt, ohne eine konsequente Durchführung zu erlauben, hat das Sextengeschlecht (Dorisch der Griechen, phrygische Kirchentonart) mittels seiner kleinen Sekunde eine viel eigentümlichere Charakteristik, die es von allen anderen Geschlechtern unterscheidet. Diese kleine Sekunde steht in derselben melodischen Beziehung zur Tonika, wie ein Leitton; nur erfordert sie absteigende Bewegung. Für absteigende Bewegung ist dieses Geschlecht melodisch ebenso günstig gebaut, wie das Durgeschlecht für aufsteigende Bewegung. Die kleine Sekunde ist die schwächste Verwandte der Tonika. Ihre Verwandtschaft zur Tonika wird vermittelt durch die Subdominante; einen Dominantenakkord kann das Geschlecht gar nicht bilden, ohne über seine Grenzen hinauszugehen. Nennen wir die Tonika *e*, so ist die Akkordkette:

$$\underbrace{d - \overbrace{\bar{f} - a}} - \underbrace{\overbrace{\bar{c} - e} - \overbrace{\bar{g} - h}} - \bar{d};$$

hierin sind aber die Akkorde $d - \bar{f} - a$ und $\bar{f} - a - \bar{c}$ nicht direkt verwandt mit dem tonischen, und der Ton $\bar{f}$ kann in gar keinen konsonanten Akkord eintreten, der dem tonischen direkt verwandt wäre. Da $\bar{f}$ nun gerade die charakteristische kleine Sekunde der Tonart ist, so können die genannten Akkorde nicht wohl ausbleiben, nicht einmal in der Kadenz. Während also zwischen den aufeinander folgenden Gliedern der Akkordkette eine enge Verwandtschaft besteht, sind doch unentbehrliche Glieder derselben nur entfernt mit dem Akkord der Tonika verwandt. Ferner wird es im Verlauf eines Satzes in dieser Tonart immer nötig werden, den Dominantenakkord $h - \underline{dis} - fis$ zu bilden, wenn derselbe auch zwei der Tonleiter ursprünglich fremde Töne enthält, um nicht den Eindruck herrschend werden zu lassen, daß a die Tonika und $a - \bar{c} - e$ der tonische Akkord sei. Daraus geht hervor, daß das Sextengeschlecht noch in-

konsequenter in seiner Harmonisierung, noch loser gebunden sein muß als das Mollgeschlecht, während es in melodischer Beziehung große Konsequenz zuläßt. Es enthält drei wesentliche Mollakkorde, nämlich den der Tonika $e — \bar{g} — h$, den der Subdominante $a — \bar{c} — e$ und denjenigen Akkord, welcher die beiden schwach verwandten Töne der Tonika enthält, $d — \bar{f} — a$. Es ist das gerade Gegenbild des Durgeschlechtes; wie dieses sich nach der Dominantseite aufbaut, tut es jenes nach der Unterdominantseite.

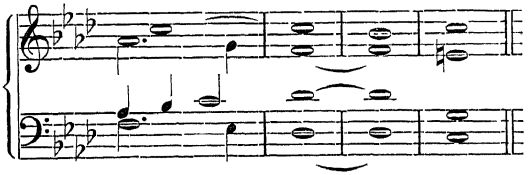
Dur: $\overbrace{f — \underline{a} — c — \underline{e} — g — \underline{h} — d}$

Dorisch: $\underbrace{b — \overline{des}}_{} — \underbrace{f — as}_{} — \underbrace{c — \overline{es} — g.}_{}$

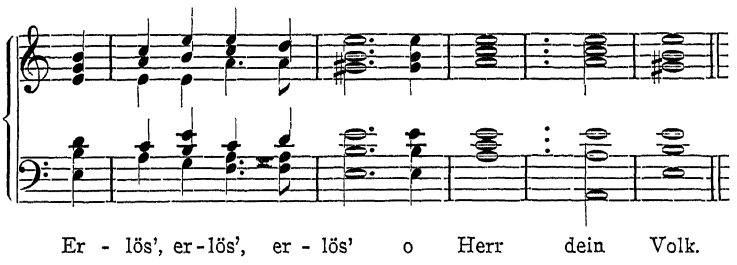
Für die Harmonisierung beruht der Unterschied auf dem Umstand, daß die Verwandten, welche die Unterdominante f in die Tonleiter einführt, nämlich b und $\overline{des}$, nicht zum Klang der Unterdominante gehören, wie es $\underline{h}$ und d, welche die Dominante in die Tonart einführt, in Beziehung auf diese tun, und daß der tonische Akkord immer auf der Dominantseite der Tonika liegt. Daher sind in der harmonischen Verbindung die Töne b und $\overline{des}$ nicht so eng, weder mit der Tonika noch mit dem tonischen Akkord, zu verknüpfen, wie es mit den der Dominante verwandten Ausfüllungstönen der Fall ist. Das Sextengeschlecht bietet deshalb bei harmonischer Bearbeitung den Charakter der Molltonart gleichsam in gesteigertem Maße. Seine Töne und Akkorde sind allerdings verbunden, aber viel weniger deutlich und erkennbar als die des Mollsystemes. Die Akkorde, welche in demselben nebeneinander zu stehen kommen können, ohne daß wir die Beziehung zur Tonika e verlassen, sind d-Moll und $\bar{f}$-Dur einerseits, h-Dur andererseits, Akkorde, die im Dursystem nur durch auffallende modulatorische Wendungen zusammenzubringen wären. Der ästhetische Charakter des Sextengeschlechtes entspricht dem; es paßt wunderbar gut für das Geheimnisvolle, Mystische, oder für den Ausdruck tiefster Niedergedrücktheit, in welchem keine Sammlung der Gedanken mehr möglich scheint, tiefstes Versinken in Schmerzgefühl. Da es andererseits durch seinen absteigenden Leitton eine gewisse Energie in seiner absteigenden Bewegung hat, so kann es auch eine ernste und mächtige Erhabenheit ausdrücken, die durch die fremdartig zusammengestellten Dur-

akkorde, welche das System enthält, sogar eine Art von eigentümlicher Pracht und wunderbarem Farbenreichtum annimmt.

Trotzdem das Sextengeschlecht in der gewöhnlichen theoretischen Musiklehre gestrichen ist, haben sich von ihm doch viel deutlichere Spuren in der musikalischen Praxis erhalten, als von den anderen alten Geschlechtern, von denen das Quartengeschlecht mit der Durtonart, das Septimengeschlecht dagegen mit dem Terzengeschlecht zur Molltonart verschmolzen sind. Freilich paßt ein Geschlecht, wie das beschriebene, nicht zu häufiger Anwendung; für lange Sätze ist es nicht fest genug zusammengeschlossen, aber sein eigentümlicher Ausdruck kann, wo er hingehört, durch kein anderes ersetzt werden. Es kündigt sich, wo es vorkommt, meist durch seine eigentümliche Schlußkadenz, die von der kleinen Sekunde in den Grundton übergeht, deutlich an. Bei Händel findet sich noch die natürliche Kadenz des Systemes mit großer Wirksamkeit angewendet. So in der großartigen Fuge im Messias: „And with his stripes we are healed“, welche die Vorzeichnung von *F*-Moll trägt, aber durch häufigen Gebrauch der Septimenharmonie auf *G* auf den Grundton *C* hinweist. Die rein dorische Kadenz ist folgende:



Ebenso im Samson, der Chor „Hör Jacob's Gott“, welcher in dorischer Tonart von *E* das Flehen der geängsteten Israeliten im Gegensatz zu den unmittelbar darauf folgenden rauschenden Opfergesängen der Philister in *G*-Dur sehr schön charakterisiert. Auch hier ist die Kadenz rein dorisch:



Der Israeliten-Chor, welcher den dritten Teil einleitet: „Im Donner komm o Gott herab", und hauptsächlich in *A*-Moll sich bewegt, hat ebenfalls einen dorischen Zwischensatz.

Auch Sebastian Bach hat in den von ihm harmonisierten Chorälen, deren Melodie dem Sextengeschlecht angehört, die Harmonisierung in diesem Geschlecht belassen, so oft der Text einen tief schmerzlichen Ausdruck erfordert, z. B. in dem *De profundis* oder „Aus tiefer Not schrei ich zu Dir", ferner in dem Liede von Paul Gerhardt: „Wenn ich einmal soll scheiden, so scheide nicht von mir", während er dieselbe Melodie zu anderen Texten, z. B. „Befiehl Du Deine Wege", „O Haupt voll Blut und Wunden" usw. in Dur oder Moll harmonisiert, wo dann die Melodie in der Terz oder Quinte der Tonart endet, statt auf der dorischen Tonika.

Daß Mozart in der Arie der Pamina im zweiten Akt der Zauberflöte dorisches Tongeschlecht angewendet hat, bemerkte schon Fortlage[1]). Eines der schönsten Beispiele für den Gegensatz dieses Geschlechtes und der Durtonart findet sich bei demselben Meister im Sextett im zweiten Akt des Don Giovanni, wo Ottavio und Donna Anna eintreten. Ottavio singt tröstende Worte

Tergi il ciglio, o vita mia
E dà calma al tuo dolore

in *D*-Dur, welches aber eigentümlich gefärbt wird dadurch, daß die Hinwendung zur Subdominante überwiegt, wie im Quartengeschlecht, wenn auch dieses nicht ohne Unterbrechung eintritt. Dann folgt in ganz ähnlichen melodiösen Wendungen und mit ebenso fortgesetzter Begleitung die in Schmerz aufgelöste Anna, deren Gesang nach einer kurzen Modulation durch *D*-Moll sich im Sextengeschlecht von *C* feststellt:

Sola morte, o mio tesoro,
Il mio pianto può finir.

Es ist hier der Gegensatz zwischen weicher Rührung und vernichtendem Schmerz hauptsächlich durch den Wechsel des Tongeschlechtes in der wunderbarsten Schönheit dargestellt. Auch der sterbende Komtur am Ende der Introduktion des Don Giovanni endigt in dorischer Kadenz. Ebenso das *Agnus Dei* des Requiem von Mozart, bei welchem letzteren freilich zweifelhaft bleibt, wieviel er selbst dazu getan hat.

[1]) Beispiele aus den Instrumentalsätzen erwähnt Ekert in seiner Habilitationsschrift „Die Prinzipien der Modulation und musikalischen Idee". Heidelberg 1860. S. 12.

Unter den Kompositionen von Beethoven könnte man den ersten Satz der Klaviersonate, Op. 90 in *E*-Moll, als einen solchen bezeichnen, der durch öfter wiederholte dorische Kadenzen einen eigentümlich gedrückten Charakter erhält, zu dem als Gegensatz der zweite Teil, ein Dursatz, von desto süßerem Ausdruck erscheint.

Die neueren Komponisten bilden eine Kadenz, die dem Sextengeschlecht angehört, oft mit der kleinen Sekunde und großen Septime, in dem sogenannten übermäßigen Sextenakkord: $\bar{f} - a - \underline{dis}$, wo sowohl *f* wie *dis* einen halben Tonschritt zur Tonika *e* zu machen haben. Dieser Akkord ist aus dem Dur- und Mollgeschlecht nicht abzuleiten, daher auch vielen neueren Theoretikern sehr rätselhaft und unerklärlich erschienen. Er erklärt sich aber leicht als ein Rest des alten Sextengeschlechtes, indem man die dem Dominantenakkord $h - \underline{dis} - fis$ angehörige große Septime *dis* mit den Tönen $\bar{f} - a$ von der Unterdominantseite vereinigt hat.

Diese Beispiele mögen hinreichen, um nachzuweisen, daß sich Reste des Sextengeschlechtes auch in der neueren Musik erhalten haben. Es werden sich leicht noch viel mehr Beispiele finden lassen, wenn man danach sucht. Die Akkordverbindungen dieses Geschlechtes sind nicht fest und deutlich genug, um weitläufige Sätze darauf bauen zu können; in kurzen Sätzen aber, Chorälen oder kürzeren Zwischensätzen und melodischen Perioden größerer musikalischer Werke ist es von einer so wirksamen Ausdrucksweise, daß man es in der modernen Theorie nicht hätte vergessen sollen, um so mehr, da es von Händel, Bach, Mozart noch an so hervorragenden Punkten ihrer Werke gebraucht worden ist[1]).

[1]) Herr A. v. Oettingen hat in seinem „Harmoniesystem in dualer Entwickelung“ (Dorpat und Leipzig 1866) die durchgehende Analogie des Sextengeschlechtes mit dem Durgeschlecht, dessen direkte Umkehrung jenes ist, in sehr interessanter Weise durchgeführt; namentlich auch gezeigt, wie diese Umkehrung zu einer eigentümlich charakteristischen Harmonisierung des Sextengeschlechtes führt. In dieser Beziehung möchte ich das Buch der Aufmerksamkeit der Musiker dringend empfehlen. Andererseits müßte, wie mir scheint, erst durch die musikalische Praxis gezeigt werden, daß das neue von dem Autor seiner Theorie des Sextengeschlechtes, welches er als das theoretisch normale Mollgeschlecht betrachtet, zugrunde gelegte Prinzip wirklich zum Aufbau größerer Musikstücke ausreicht. Derselbe betrachtet nämlich den Molldreiklang $c - \overline{es} - g$ als Repräsentanten des den drei Klängen gemeinsamen Tones g'', und nennt ihn deshalb den „phonischen *g*-Klang“, während $c - e - g$ wie bei uns als „tonischer *c*-Klang“ betrachtet wird.

Ähnlich verhält es sich übrigens auch mit dem Quartengeschlecht und Septimengeschlecht, obgleich diese beiden weniger spezifisch verschieden sind, jenes von Dur, dieses von Moll. Sie sind doch immer imstande, gewissen musikalischen Perioden einen eigentümlichen Ausdruck zu geben, wenn es auch Schwierigkeiten haben würde, ihre Eigentümlichkeiten in längeren Sätzen konsequent fühlen zu lassen. Die harmonischen Wendungen, welche den beiden letztgenannten Geschlechtern zukommen, können allerdings auch innerhalb der Grenzen des gewöhnlichen Dur- und Mollsystemes ausgeführt werden. Es wäre aber doch vielleicht eine Erleichterung für die theoretische Auffassung gewisser Modulationen, wenn man den Begriff dieser Geschlechter und ihrer Harmonisierung festgehalten hätte.

Der Vorzug der modernen Tonarten besteht also, wie die geschichtliche Entwickelung und die physiologische Theorie übereinstimmend zeigen, nur für die harmonische Musik. Ihre Bildung ist hervorgerufen durch das ästhetische Prinzip der modernen Musik, daß der tonische Akkord in der Reihe der Akkorde nach demselben Gesetz der Verwandtschaft herrschen soll, wie die Tonika in der Tonleiter. Zur faktischen Herrschaft ist dieses Prinzip erst seit dem Anfang des vorigen Jahrhunderts gekommen, seit man die Notwendigkeit fühlte, auch den tonischen Mollakkord der Regel nach in der Schlußkadenz zu bewahren.

Das physiologische Phänomen, welches unter diesem ästhetischen Prinzip zur Wirksamkeit kam, ist, daß musikalische Klänge an sich schon Akkorde von Partialtönen sind, und daher umgekehrt Akkorde unter gewissen Umständen auch Klänge vertreten können. Dieses Umstandes wegen spielt in jedem Dreiklang einer seiner Töne eine Hauptrolle, derjenige nämlich, als dessen Klang der Akkord angesehen werden kann. Praktisch hatte dies Prinzip längst Anerkennung erhalten, sobald man anfing, die Schlüsse der Tonsätze aus mehrstimmigen Akkorden zu bilden. Man fühlte hierbei sogleich, daß man über dem Schlußton des Basses eine Oktave, eine Quinte, endlich eine große Terz hinzufügen durfte, aber man durfte keine Quarte, keine Sexte hinzufügen, und lange genug scheute man auch die kleine Terz. Jene ersten drei Intervalle liegen eben im Klang der im Baß liegenden Tonika, die letzteren nicht.

Ihre theoretische Anerkennung erhielt die verschiedene Geltung der Töne in einem Akkord erst durch Rameau in seiner Lehre vom Fundamentalbaß, obgleich Rameau den von uns nachgewiesenen Grund dieser verschiedenen Geltung noch nicht kannte. Derjenige Ton, dessen Klang der Akkord nach unserer Erklärung darstellt, wird sein Fundamentalbaß, sein Grundton genannt, zum Unterschied von dem gewöhnlich so genannten Baßton, d. h. dem Ton seiner tiefsten Stimme. Der Durdreiklang hat in jeder Umlagerung immer denselben Fundamentalbaß. In den Akkorden $c—e—g$ oder $g—c—\underline{e}$ ist es immer nur c. Der Mollakkord $d—\bar{f}—a$ hat ebenso in seinen verschiedenen Umlagerungen in der Regel nur d als Grundton, aber im großen Sextenakkord $\bar{f}—a—d$ kann er auch $\bar{f}$ als Grundton haben; in diesem Sinn kommt er in der Kadenz von $\bar{c}$-Dur vor. Diesen letzteren Unterschied haben Rameaus Nachfolger zum Teil aufgegeben; es ist aber hierin Rameaus künstlerisches Gefühl der Natur der Sache ganz entsprechend gewesen. Der Mollakkord läßt in der Tat diese zweifache Deutung zu, wie wir oben gezeigt haben.

Der wesentliche Unterschied der alten und neuen Tonarten liegt darin, daß jene ihre Mollakkorde auf die Seite der Dominante, diese auf die der Subdominante stellen:

		Akkord der		
		Subdominante	Tonika	Dominante
Alt	Terzengeschlecht	Moll	Moll	Moll
	Septimengeschlecht	Dur	„	„
	Quartengeschlecht	„	Dur	„
Durgeschlecht		„	„	Dur
Neu	Moll-Durgeschlecht	Moll	„	„
	Mollgeschlecht	„	Moll	„

Die Gründe dieser Konstruktion sind vorher schon erörtert.

Sechzehnter Abschnitt.

Das System der Tonarten.

Die Höhe der Tonika einer musikalischen Komposition ist zunächst durch nichts fixiert. Hat man nun musikalische Instrumente oder Gesangstimmen von bestimmt begrenztem Umfang, von welchen verschiedene Melodien und Musikstücke ausgeführt werden sollen, so wird man die Tonika verschieden hoch wählen müssen, je nachdem die Melodie hoch über die Tonika hinaufgeht, oder tief unter sie hinab. Die Tonika muß ihrer Höhe nach so gelegt werden, daß der Umfang der Töne des Musikstückes in den Umfang der Stimme oder desjenigen Instrumentes hineinpaßt, durch das es ausgeführt werden soll. Diese unausweichbare praktische Rücksicht fordert die Möglichkeit, den Grundton jedes Musikstückes in beliebiger Höhe wählen zu können.

Ferner tritt bei längeren Musikstücken das Bedürfnis ein, die Tonika zeitweise zu verändern, d. h. zu modulieren, um Einförmigkeit zu vermeiden, und um die musikalischen Wirkungen der Veränderung und des Wiederfindens der ursprünglichen Tonart zu benutzen. Wie die Konsonanzen durch die Dissonanzen hervorgehoben und wirksamer gemacht werden, so wird das Gefühl der herrschenden Tonalität und die Befriedigung in ihr durch vorausgehende Abweichungen nach nahe gelegenen Tonarten verstärkt. Die durch modulatorische Veränderungen bedingte Mannigfaltigkeit musikalischer Wendungen ist für die neuere Musik um so notwendiger geworden, als sie das alte Prinzip der Abänderung des Ausdruckes mittels der verschiedenen Tongeschlechter hat aufgeben oder wenigstens auf ein sehr enges Maß zurückführen müssen. Den Griechen standen sieben verschiedene Tongeschlechter zur Wahl frei, dem Mittelalter fünf oder sechs, uns nur zwei, Dur und Moll. Jene alten

Tongeschlechter boten eine Reihe verschiedener Abstufungen des Toncharakters dar, von denen in der harmonischen Musik nur noch zwei brauchbar geblieben sind. Bei dem deutlicheren und festeren Bau eines harmonischen Satzes können sich dagegen die neueren größere Freiheit in modulatorischen Abweichungen von der ursprünglichen Tonika erlauben, und dadurch ein neues Gebiet musikalischen Reichtums betreten, welches den Alten jedenfalls nur sehr wenig zugänglich war.

Endlich muß ich noch die viel besprochene Frage erwähnen, ob die verschiedenen Tonarten an sich einen verschiedenen Charakter haben.

Daß innerhalb eines Tonstückes modulatorische Ausweichungen in die verschiedenen mehr oder weniger entfernten Tonarten der Ober- oder Unterdominantseite einen sehr verschiedenen Effekt machen, ist klar. Das ist aber nur im Gegensatz gegen die zuerst festgestellte Haupttonart der Fall. Dies wäre nur ein relativer Charakter. Die hier aufzuwerfende Frage wäre, ob ihnen unabhängig von ihrem Verhalten zu einer anderen Tonart ein besonderer absoluter Charakter zukommt.

Es ist dies oft behauptet worden, aber schwer zu entscheiden, wieviel daran wahr sei, und was eigentlich darunter verstanden werde, weil vielleicht vielerlei sehr Verschiedenes unter diesem Namen zusammengefaßt wird, und namentlich nicht unterschieden worden ist, wieviel den einzelnen Instrumenten dabei zukommt. Wenn ein Instrument mit festen Tönen durchgängig gleichmäßig nach der gleichschwebenden Temperatur gestimmt ist, also alle halben Töne durch die ganze Skala hindurch gleiche Größe haben, und auch die Klangfarbe aller Töne dieselbe ist, so ist kein Grund einzusehen, warum Stücke in verschiedenen Tonarten verschiedenen Charakter haben sollen, und es wurde mir auch von urteilsfähigen Musikern zugegeben, daß ein verschiedener Charakter der Tonarten auf der Orgel z. B. nicht zu bemerken sei. Dasselbe, glaube ich, behauptet Hauptmann[1]) mit Recht vom Gesang mit Orgelbegleitung oder ohne Begleitung. Höchstens kann eine stärkere Veränderung in der Höhe der Tonika bewirken, daß sämtliche hohen Töne zu angestrengt, oder sämtliche tiefe zu matt werden.

[1]) Harmonik und Metrik, S. 188.

Dagegen ist auf den Klavieren und bei den Streichinstrumenten entschieden ein verschiedener Charakter der Tonarten vorhanden. *C*-Dur und das benachbarte *Des*-Dur klingen verschieden. Daß nun dieser Unterschied nicht von der absoluten Tonhöhe abhängt, kann man leicht erkennen, wenn man zwei verschiedene Instrumente von verschiedener Stimmung vergleicht. Es kann das *Des* des tieferen Instrumentes gleich hoch sein mit dem *C* des höheren, und doch behält auf beiden *C*-Dur seinen kräftigen klaren Charakter und *Des*-Dur seinen weichen wie verschleierten Wohlklang. Man kann hier kaum an etwas anderes denken, als daß der Anschlag der kürzeren und schmalen Obertasten des Klaviers eine etwas andere Klangfarbe gibt als der Anschlag der Untertasten, und je nachdem der kräftigere oder weichere Klang sich auf die verschiedenen Stufen der Tonart verteilt, ein anderer Charakter eintritt. Ob dazu etwa regelmäßige Unterschiede der Stimmung derjenigen Quinten, welche die Klavierstimmer zuletzt stimmen, und auf welche sich die Fehler der übrigen Quinten des Quintenzirkels zusammendrängen, beitragen, wage ich nicht aus Erfahrung zu entscheiden.

Bei den Streichinstrumenten sind es die leeren Saiten, welche durch ihre kräftigere Klangfarbe hervortreten, und auch vielleicht Unterschiede im Klang der stark verkürzten und wenig verkürzten Saiten, welche den Charakter der Tonarten ändern können, je nachdem sie auf diese oder jene Stufe der Leiter fallen. Diese Annahme wurde mir bestätigt durch Fragen, die ich an Musiker richtete, woran sie in bestimmten Fällen die Tonart erkennen. Dazu kommen auch wohl Ungleichmäßigkeiten der Stimmung. Die Quinten der leeren Saiten sind reine Quinten. Daneben können nicht alle anderen Quinten rein sein, wenn wirklich beim Spielen in verschiedenen Tonarten allen Tönen immer derselbe Wert gegeben wird, wie es wenigstens die Absicht beim Unterricht im Violinspiel meist zu sein pflegt. Somit werden sich also die Leitern in den verschiedenen Tonarten auch in der Stimmung unterscheiden können, was natürlich einen noch viel wesentlicheren Einfluß auf den Charakter der Melodie haben würde.

Noch größer sind die Unterschiede in der Klangfarbe verschiedener Noten bei den meisten Blasinstrumenten.

Wenn diese Ansicht der Sache richtig ist, würde sich der Charakter der Tonarten nach den verschiedenen Instrumenten sehr

verschieden verhalten müssen, was, wie ich glaube, auch der Fall ist. Indessen ist dies doch ein Punkt, der nur von einem sehr fein hörenden Musiker entschieden werden kann, wenn er auf die hier sich aufdrängenden Fragen sein Augenmerk richtet.

Es wäre übrigens nicht unmöglich, daß durch eine Eigentümlichkeit des menschlichen Ohres, die ich schon oben S. 188 berührt habe, auch gewisse gemeinsame Züge in dem Charakter der Tonarten eintreten, die von der Verschiedenheit der Instrumente unabhängig sind, und nur von der absoluten Tonhöhe der Tonika abhängen. Das *g''''* ist nämlich ein Eigenton des menschlichen Ohres, und klingt daher dem unbewaffneten Ohr besonders schrill; etwas von dieser Schärfe kommt auch noch dem *fis''''* und *as''''* zu. In geringerem Maße zeigen diejenigen Klänge, in denen jenes *g''''* als Oberton vorkommt, einen etwas helleren und schärferen Klang als ihre Nachbarn, nämlich das *g'''*, *c'''* und *g''*. Es mag nun für Stücke in *C*-Dur nicht gleichgültig sein, wenn ihre hohe Quinte *g''* und Tonika *c'''* diesen scharfen Klang vor den anderen Tönen zeigen, aber jedenfalls sind diese Unterschiede nur schwach, und ich muß es vorläufig dahingestellt sein lassen, ob sie in das Gewicht fallen.

Alle oder einige dieser Gründe machten es nun für die Musiker nötig, frei über die Höhe der zu wählenden Tonika schalten zu können, daher denn auch schon die späteren Griechen ihre Tonleitern auf alle Stufen der chromatischen Skala transponierten. Für die Sänger haben nun solche Transpositionen gar keine Schwierigkeit, sie können eben mit jedem Grundton anfangen und finden überall in ihrer Stimme die Tonstufen, die dann folgen. Aber schwieriger war die Sache für die musikalischen Instrumente, namentlich für diejenigen, welche überhaupt nur gewisse feste Tonstufen besitzen. Die Schwierigkeit fällt aber auch selbst für diejenigen Instrumente nicht ganz fort, welche, wie die Streichinstrumente, zwar jede Tonstufe hervorbringen können, bei denen aber der Lernende zunächst auf die mechanische Einübung der Finger angewiesen ist, um die Tonstufen richtig zu treffen, und erst durch eine vollendete Übung des Spieles die Fähigkeit erlangt, jeden Ton sicher spielen zu können, wie ihn das Ohr fordert.

Indessen auch für die Instrumente war das griechische System noch nicht mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, solange man

keine Ausweichungen in entferntere Tonarten ausführte, und sich mit wenigen Versetzungszeichen begnügte. Bis zum Anfang des 17. Jahrhunderts begnügte man sich mit zwei Erniedrigungszeichen, um die Noten *B* und *Es* zu gewinnen, und dem Zeichen ♯ für *Fis*, *Cis*, *Gis*, um die Leittöne für die Tonika *G*, *D* und *A* zu haben. Man vermied aber die enharmonisch ähnlichen Töne *Dis*, *Ais*, *As*, *Des*, *Ges* anzuwenden. Mit Hilfe des *B* statt *H* konnte man jedes Tongeschlecht nach seiner Subdominante transponieren; andere Transpositionen machte man nicht.

Im pythagoreischen System, welches bis Zarlino im 16. Jahrhundert seine Herrschaft über die Theorie behielt, stimmte man nur nach Quinten, also von *C* in Quinten aufwärts gehend:

C G D A E H Fis Cis
Gis Dis Ais Eis His.

Wenn wir immer um zwei Quinten aufwärts und um eine Oktave zurückgehen, so ist ein solcher Schritt $\frac{3}{2}\cdot\frac{3}{2}\cdot\frac{1}{2} = \frac{9}{8}$ gleich einer großen Sekunde. Das gibt die Noten

$$\begin{array}{cccccccc} C & D & E & Fis & Gis & Ais & His \\ 1 & \frac{9}{8} & \left(\frac{9}{8}\right)^2 & \left(\frac{9}{8}\right)^3 & \left(\frac{9}{8}\right)^4 & \left(\frac{9}{8}\right)^5 & \left(\frac{9}{8}\right)^6. \end{array}$$

Gehen wir von *C* aus abwärts in Quinten, so erhalten wir die Tonreihe

C F B Es As Des Ges Ces
Fes Bb Eses Ases Deses.

Oder wenn wir immer um zwei Quinten abwärts und dann um eine Oktave hinaufgehen, erhalten wir die Töne

$$\begin{array}{cccccccc} C & B & As & Ges & Fes & Eses & Deses \\ 1 & \left(\frac{8}{9}\right) & \left(\frac{8}{9}\right)^2 & \left(\frac{8}{9}\right)^3 & \left(\frac{8}{9}\right)^4 & \left(\frac{8}{9}\right)^5 & \left(\frac{8}{9}\right)^6. \end{array}$$

Nun ist das Intervall $\left(\frac{8}{9}\right)^6 = \frac{262144}{531441} = \frac{1}{2}\cdot\frac{524288}{531441}$ oder abgekürzt:

$$\left(\frac{8}{9}\right)^6 = \frac{1}{2}\cdot\frac{73}{74}$$
$$\left(\frac{9}{8}\right)^6 = 2\cdot\frac{74}{73}.$$

Es ist also der Ton *His* um das kleine Intervall $\frac{74}{73}$ höher als die Oktave von *C*, und der Ton *Deses* ist um ebensoviel niedriger als die untere Oktave von *C*. Wenn wir nun von *C* und *Deses* in reinen Quinten aufwärts schreiten, findet sich derselbe konstante Unterschied zwischen

C	und	*Deses*	*Cis*	und	*Des*
G	„	*Ases*	*Gis*	„	*As*
D	„	*Eses*	*Dis*	„	*Es*
A	„	*Bb*	*Ais*	„	*B*
E	„	*Fes*	*Eis*	„	*F*
H	„	*Ces*	*His*	„	*C*
Fis	„	*Ges*			

Die links stehenden Töne sind alle um $\frac{74}{73}$ höher als die rechts stehenden. Unsere Notenschrift, deren Prinzipien sich noch vor der Feststellung des modernen Tonsystemes entwickelt haben, hat die Unterschiede der rechts und links stehenden Töne festgehalten. Für die Praxis auf Instrumenten mit festen Tonstufen wurde aber die Unterscheidung so nahe liegender Tonstufen unbequem und man suchte sie zu verschmelzen. Dies führte nach mancherlei unvollkommeneren Versuchen, bei denen man einzelne Intervalle mehr oder weniger veränderte, um die anderen rein zu erhalten, sogenannten ungleichschwebenden Temperaturen, endlich zu dem System der gleichschwebenden Temperatur, bei welcher man die Oktave in zwölf ganz gleich große Tonstufen einteilte. Wir haben gesehen, daß man vom *C* durch zwölf reine Quinten zum *His* kommt, welches sich von dem *C* nur um etwa $\frac{1}{5}$ einer halben Tonstufe, nämlich das Intervall $\frac{74}{73}$ unterscheidet. Ebenso gelangt man von *C* durch zwölf Quinten abwärtsgehend zum *Deses*, welches um ebensoviel tiefer als *C* ist, wie *His* höher ist. Setzt man also $C = His = Deses$, und verteilt die kleine Abweichung von $\frac{74}{73}$ auf alle zwölf Quinten jedes Zirkels gleichmäßig, so wird jede Quinte um etwa $\frac{1}{60}$ einer halben Tonstufe unrein, eine Abweichung, die allerdings sehr klein ist. Dadurch ist alle Verschiedenheit der Tonstufen innerhalb einer Oktave auf die zwölf Stufen zurückgeführt, wie wir sie in unseren modernen Tastaturinstrumenten haben.

Die Quinte des gleichschwebenden Systemes ist in möglichst kleinen ganzen Zahlen annähernd ausgedrückt gleich $\frac{3}{2} \cdot \frac{886}{886}$. Ihre Anwendung statt der reinen Quinte wird in der Tat in den seltensten Fällen einen Anstand erleiden können. Der Grundton mit seiner temperierten Quinte zusammen angeschlagen, gibt eine Schwebung in der Zeit, wo die Quinte $442\frac{1}{2}$ Schwingungen macht. Da das eingestrichene a_1

440 Schwingungen in der Sekunde macht, so muß die temperierte Quinte $d_1 - a_1$ ziemlich genau eine Schwebung in der Sekunde geben. Das würde bei lang ausgehaltenen Tönen allerdings schon bemerkt werden können, ist aber nicht gerade störend; bei schneller Bewegung haben solche Schwebungen gar nicht Zeit, zustande zu kommen. Noch weniger stören sie in tieferen Lagen, wo die Schwebungen in dem Verhältnis langsamer werden, als die absoluten Schwingungszahlen abnehmen. In den höheren Lagen aber werden sie allerdings auffälliger; $d''' - a'''$ gibt vier Schwebungen, $a''' - e'''$ sechs Schwebungen in der Sekunde; indessen so hohe Akkordlagen werden selten in langsamen Noten vorkommen, meist nur in schneller Bewegung. Die Quarten des gleichschwebend temperierten Systemes sind $\frac{4}{3} \cdot \frac{886}{885}$. Eine Schwebung geschieht in der Zeit, wo der tiefere Ton der Quarte $221^1/_4$ Schwingungen macht. Die Quarte $a - d_1$ macht also eine Schwebung in der Sekunde, wie die Quinte $d_1 - a_1$. Die reinen Konsonanzen also, welche das pythagoreische System beibehält, werden in der gleichschwebenden Temperatur nicht in einer wesentlich in Betracht kommenden Weise verschlechtert. Und in der melodischen Folge der Töne ist das Intervall $\frac{885}{886}$ in der eingestrichenen Oktave nach Preyers Versuchen (s. S. 242) gerade an der Grenze der überhaupt unterscheidbaren Unterschiede der Tonhöhe. In der zweigestrichenen Oktave wäre es schon gut erkennbar, in den ungestrichenen oder noch tieferen Oktaven dagegen nicht zu unterscheiden.

Die Terzen und Sexten der gleichschwebenden Temperatur liegen der reinen näher als die pythagoreischen.

	Rein	Gleichschwebend	Pythagoreisch
Große Terz	$\frac{5}{4}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{127}{126}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{81}{80}$
Kleine Sexte	$\frac{8}{5}$	$\frac{8}{5} \cdot \frac{126}{127}$	$\frac{8}{5} \cdot \frac{80}{81}$
Kleine Terz	$\frac{6}{5}$	$\frac{6}{5} \cdot \frac{121}{122}$	$\frac{6}{5} \cdot \frac{80}{81}$
Große Sexte	$\frac{5}{3}$	$\frac{5}{3} \cdot \frac{122}{121}$	$\frac{5}{3} \cdot \frac{81}{80}$
Halber Ton	$\frac{16}{15}$	$\frac{18}{17}$ oder $\frac{16}{15} \cdot \frac{147}{148}$	$\frac{21}{20}$ oder $\frac{16}{15} \cdot \frac{80}{81}$

Die durch die Obertöne bewirkte Dissonanz fällt deshalb bei den gleichschwebenden Terzen etwas milder aus als bei den pythago-

reischen, aber ihre Kombinationstöne sind wohl noch unangenehmer. Für die pythagoreischen Terzen $c'—e'$ und $e'—g'$ sind die Kombinationstöne *Cis* und H_1, beide um einen halben Ton verschieden von dem Kombinationston *C*, der bei reiner Stimmung von beiden Terzen hervorgebracht wird. Im Mollakkord $e'—g'—h'$ sind die Kombinationstöne der pythagoreischen Terzen H_1 und *Gis*; der erste paßt gut, sogar besser als der Kombinationston *C*, der bei reiner Stimmung hervortritt. Der zweite Kombinationston *Gis* dagegen gehört nicht dem Mollakkord von *E*, sondern dem Durakkord an. Da aber von den beiden Kombinationstönen der reinen Stimmung *C* und *G* auch einer falsch ist, so ist in dieser Beziehung die pythagoreische Stimmung nicht gerade im Nachteil. Die Kombinationstöne der gleichschwebenden Terzen liegen nun zwischen denen der reinen und denen der pythagoreischen Terzen um weniger als einen halben Ton von denen der reinen Temperatur entfernt; sie entsprechen also keiner möglichen Modulation, keinem Ton der chromatischen Skala, keiner Dissonanz, die durch irgend eine Melodieführung eintreten könnte, sie klingen eben einfach verstimmt und falsch.

Diese schlechten Kombinationstöne sind mir immer das Quälendste gewesen in der Harmonie der gleichschwebenden Temperatur; namentlich wenn in hoher Lage nicht zu schnelle Terzengänge gespielt werden, bilden sie eine abscheuliche Art Grundbaß dazu, der um so unangenehmer ist, als er dem richtigen Grundbaß ziemlich nahe kommt und so klingt, als würde dieser von einem ganz verstimmten Instrument ausgeführt. Am deutlichsten hört man sie an dem Harmonium und an Violinen. Hier bemerkt sie auch jeder Musiker und jeder geübte musikalische Dilettant sogleich, wenn man ihn darauf aufmerksam macht. Wenn man sich aber erst gewöhnt hat, sie zu hören, treten sie auch auf dem Klavier hervor. In der griechischen Stimmung fallen die Kombinationstöne mehr so, als wenn jemand absichtlich Dissonanzen dazu spielte. Was von diesen beiden Übeln das geringere sei, wage ich nicht zu entscheiden. In tieferer Lage, wo man die zu tief liegenden Kombinationstöne schwer oder gar nicht hört, verdienen jedenfalls die gleichschwebenden Terzen den Vorzug vor den griechischen, weil sie weniger rauh sind, weniger Schwebungen geben. In hoher Lage dagegen wird ihr Vorzug durch die Kombinationstöne vielleicht wieder aufgehoben. Jedenfalls ist aber

das gleichschwebende System alles zu leisten imstande, was das pythagoreische leistete, und zwar mit weniger Mitteln.

C. E. Naumann[1]), der neuerlich das pythagoreische System dem gleichschwebenden gegenüber verteidigt hat, legt das Hauptgewicht seiner Gründe darauf, daß die halben Töne, welche den aufwärts steigenden Leitton von der Tonika und die absteigende kleine Septime von der Terz des Auflösungsdreiklanges trennen, im pythagoreischen System kleiner sind, nämlich $\frac{21}{20}$, als im gleichschwebenden, wo sie $\frac{18}{17}$ betragen; am größten sind sie in der reinen Stimmung, nämlich $\frac{16}{15}$. Während nun in der gleichschwebenden Temperatur zwischen *f* und *g* ein einziger Ton liegt, der bald als *fis* Leitton für *g*, bald als *ges* eine nach *f* sich auflösende Septime darstellt, so wird in der pythagoreischen Stimmung *ges* etwas tiefer als *fis*; es nähert sich also der Halbton derjenigen Seite, nach welcher er sich in regelmäßiger Fortschreitung aufzulösen hat, und die Tonhöhe würde für die Richtung der Auflösung bezeichnend sein. Aber wenn auch der Leitton eine wichtige Rolle in den Modulationen spielt, so ist es doch wohl klar, daß wir nicht berechtigt sind, bloß um ihn seiner Auflösung näher zu rücken, die betreffende Tonstufe willkürlich zu verändern. Wir würden sonst keine Grenze finden, ihn dem Auflösungston immer noch näher und näher zu rücken, wie im enharmonischen Geschlecht der Griechen. Wenn man aber wirklich von dem pythagoreischen halben Ton, der etwa $\frac{4}{5}$ des natürlichen beträgt, auf einen noch kleineren von $\frac{3}{5}$ etwa $(\frac{16}{15} \cdot \frac{80}{81} \cdot \frac{80}{81})$ herabgeht, so klingt ein solcher Leitton schon ganz unnatürlich. Wir haben schon früher gesehen, wie der Charakter des Leittones wesentlich davon abhängt, daß es derjenige Ton der Skala ist, der die schwächste Verwandtschaft zur Tonika hat, dessen Stimmung deshalb am unsichersten ist und am ehesten etwas verändert werden kann. Wir dürfen also gerade von einem solchen Ton am allerwenigsten das Prinzip für die Einrichtung unserer Tonleiter hernehmen.

Der Hauptfehler unserer gegenwärtigen temperierten Stimmung liegt also nicht in den Quinten; denn deren Unreinheit ist wirklich nicht der Rede wert und macht sich auch in Akkorden kaum bemerklich. Der Fehler liegt vielmehr in den Terzen, und zwar ist er

[1]) Über die verschiedenen Bestimmungen der Tonverhältnisse. Leipzig 1858.

nicht veranlaßt dadurch, daß man die Terzen durch eine Folge unreiner Quinten bestimmt hat, sondern es ist der alte Fehler des pythagoreischen Systemes, daß man überhaupt die Terzen mittels einer aufsteigenden Folge von vier Quinten bestimmt. Die reinen Quinten sind hier sogar noch schlimmer als die unreinen. Die natürliche Verwandtschaft der Terz zur Tonika beruht in dem Schwingungsverhältnis $\frac{4}{5}$, sowohl melodisch als harmonisch. Jede andere Terz kann nur ein mehr oder weniger ungenügendes Surrogat für die natürliche Terz sein. Das einzige richtige Tonsystem ist dasjenige, welches in der von Hauptmann vorgeschlagenen Weise die durch Quinten hervorgebrachten Töne von den durch Terzen hervorgebrachten unterscheidet. Da es nun für eine große Zahl von theoretischen Fragen von Wichtigkeit ist, Beobachtungen anstellen zu können an Tönen, welche wirklich die theoretisch geforderten natürlichen Intervalle miteinander bilden, um nicht getäuscht zu werden durch die Unvollkommenheiten der gleichschwebenden Temperatur, so habe ich versucht, ein Instrument herstellen zu lassen, welches imstande ist, durch alle Tonarten in reinen Intervallen modulieren zu können.

Müßten wir wirklich das System der Töne, wie es Hauptmann unterscheidet, in ganzer Vollständigkeit herstellen, um reine Intervalle in allen Tonarten zu haben, so würde es freilich kaum möglich sein, die Schwierigkeit der Aufgabe zu bewältigen. Glücklicherweise läßt sich eine sehr große und wesentliche Vereinfachung darin erzielen mittels des Kunstgriffes, den ursprünglich die arabisch-persischen Musiker erfunden haben und den wir oben S. 457 schon erwähnten.

Wir haben gesehen, daß die durch Quinten erzeugten und mit ungestrichenen Buchstaben $c — g — d — a$ usw. bezeichneten Töne des Hauptmannschen Systemes um das Intervall $\frac{81}{80}$ oder ein pythagoreisches Komma höher sind, als die durch Terzen erzeugten gleichnamigen Töne $\underline{c} — \underline{g} — \underline{d} — \underline{a}$. Wir haben ferner gesehen, daß, wenn wir von h durch eine Reihe von zwölf Quinten herabgehen bis *ces*, der letztere Ton, in die richtige Oktave verlegt, annähernd um das Intervall $\frac{74}{73}$ tiefer ist als h. Es ist also:

$$h : \underline{h} = 81 : 80,$$
$$h : ces = 74 : 73.$$

Diese beiden Intervalle sind nahehin gleich; $\underline{h}$ ist etwas höher als *ces*, aber nur im genauen Verhältnis:

$$ces : \underline{h} = 32\,768 : 32\,805,$$

oder angenähert nach der Reduktion durch Kettenbrüche:

$$ces : \underline{h} = 886 : 887.$$

Der Unterschied zwischen *ces* und $\underline{h}$ ist also etwa so groß, wie zwischen der reinen und temperierten Quinte desselben Tones.

Nun ist $\underline{h}$ die reine Terz von g; gehen wir von g durch Quinten rückwärts bis *ces*:

$$g - c - f - b - es - as - des - ges - ces,$$

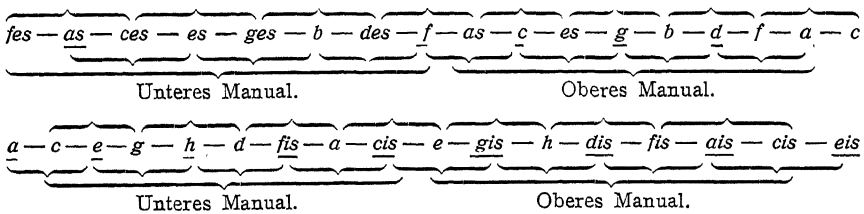
so müssen wir dazu acht Quintenschritte machen. Machen wir diese Quinten alle etwas zu groß, nämlich um $\frac{1}{8}$ des sehr kleinen Intervalles $\frac{887}{886}$, so wird $ces = \underline{h}$ werden. Da nun das Intervall $\frac{887}{886}$ an der Grenze der wahrnehmbaren Tonunterschiede liegt, so wird der achte Teil dieses Intervalles gar nicht mehr in Betracht kommen, und wir können also folgende Töne des Hauptmannschen Systemes identifizieren, indem wir von $ces = \underline{h}$ in Quinten fortschreiten:

$$\begin{aligned} fes &= \underline{e} \\ ces &= \underline{h} \\ ges &= \underline{fis} \\ des &= \underline{cis} \\ as &= \underline{gis} \\ es &= \underline{dis} \\ b &= \underline{ais} \end{aligned}$$

Unter den musikalischen Instrumenten ist das Harmonium wegen seiner gleichmäßig anhaltenden Töne, wegen der Schärfe ihrer Klangfarbe, und wegen der ziemlich deutlichen Kombinationstöne besonders empfindlich gegen Ungenauigkeiten der Stimmung. Dasselbe läßt aber eine sehr feine und dauerhafte Stimmung seiner Zungen zu, so daß es mir besonders günstig erschien zu den Versuchen über ein reineres Tonsystem. Ich habe deshalb an einem Harmonium der größeren Art[1]) mit zwei Manualen ein Register Zungen, welches dem unteren Manual, und eines, welches dem oberen angehört, in der Weise stimmen lassen, daß ich mit Benutzung der Töne beider Manuale

[1]) Von den Herren J. und P. Schiedmayer in Stuttgart.

die Durakkorde von *Fes*-Dur bis *Fis*-Dur rein herstellen konnte. Die Verteilung der Töne ist folgende:



Das Instrument gibt also 15 Durakkorde und ebensoviel Mollakkorde, in denen die großen Terzen ganz rein, die Quinten aber um $\frac{1}{8}$ desjenigen Intervalles zu hoch sind, um welches sie in der gleichschwebenden Temperatur zu niedrig sind. Man hat im unteren Manual die ganze Tonleiter *Ces*-Dur und *G*-Dur vollständig, im oberen die ganze Leiter von *Es*-Dur und *H*-Dur. Es sind überhaupt alle Durtonarten zwischen *Ces*-Dur und *H*-Dur vollständig vorhanden, und man kann sie alle rein in der natürlichen Tonleiter ausführen; will man aber einerseits über *H*-Dur, andererseits über *Ces*-Dur hinaus modulieren, so muß man eine wirkliche enharmonische Verwechselung zwischen *H* und *Ces* ausführen, wobei sich die Tonhöhe merklich ändert (um ein Komma $\frac{81}{80}$). Von Molltonarten ist auf dem unteren Manual *H*- oder *Ces*-Moll vollständig, auf dem oberen *Dis*- oder *Es*-Moll [1]).

Für die Molltonarten ist die Reihe dieser Töne nicht ganz so genügend, wie für die Durtonarten. Da nämlich die Dominante der

[1]) Die Einstimmigkeit des Instrumentes hat sich als sehr leicht ergeben. Herr Schiedmayer kam gleich beim ersten Versuch nach folgender Vorschrift damit zustande: Von *a* ausgehend, wurden auf dem unteren Manual die Quinten *d* — *a*, *g* — *d*, *c* — *g* ganz rein gestimmt, wodurch man die Töne *c*, *g*, *d* erhielt. Dann die Durakkorde *c* — *e* — *g*, *g* — *h* — *d*, *d* — *fis* — *a*, was die drei Töne *e*, *h*, *fis* ergab, endlich die Quinte *fis* — *cis*, um *cis* zu erhalten. Indem man nun *e* = *fes*, *h* = *ces*, *fis* = *ges*, *cis* = *des* setzt, stimmt man die Durakkorde *fes* — *as* — *ces*, *ces* — *es* — *ges*, *ges* — *b* — *des* mit reinen Terzen, bis man keine Schwebungen mehr hört, endlich die Quinte *b* — *f*. Dann sind alle Töne des unteren Manuals bestimmt. Im oberen stimmt man zunächst *e*, die Quinte des unteren *a*, und die drei Durakkorde *e* — *gis* — *h*, *h* — *dis* — *fis*, *fis* — *ais* — *cis* und die Quinte *ais* — *eis*. Dann, indem man *gis* = *as*, *dis* = *es*, *ais* = *b*, *eis* = *f* setzt, noch die Terzen in den Durakkorden: *as* — *c* — *es*, *es* — *g* — *b*, *b* — *d* — *f*, und die Quinte *d* — *a*. Dann sind alle Töne bestimmt. Dies Stimmen ist viel leichter, als wenn man eine Reihe gleich temperierter Töne herstellen soll.

Molltonarten Quinte eines Mollakkordes und Grundton eines Durakkordes ist, die Mollakkorde aber der Regel nach zu schreiben sind wie: $\underline{a} - c - \underline{e}$, die Durakkorde wie: $fes - \underline{as} - ces$, so muß die betreffende Dominante im ersten Akkord mit einem unterstrichenen Buchstaben, im zweiten ohne Strich geschrieben werden können, d. h. sie muß einer von den enharmonisch zu verwechselnden Tönen sein, wie in dem gegebenen Beispiel, wo $\underline{e}$ mit fes identisch ist. Also haben wir auf dem Instrument vollständig rein die Molltonarten:

1. $\underline{a}$- oder bb-Moll: $\underline{d} - f - \underline{a} - c - \underline{e}$
   $fes - \underline{as} - ces$
2. $\underline{e}$- oder fes-Moll: $\underline{a} - c - \underline{e} - g - \underline{h}$
   $ces - \underline{es} - ges$
3. $\underline{h}$- oder ces-Moll: $\underline{e} - g - \underline{h} - d - \underline{fis}$
   $ges - \underline{b} - des$
4. $\underline{fis}$- oder ges-Moll: $\underline{h} - d - \underline{fis} - a - \underline{cis}$
   $des - \underline{f} - as$
5. $\underline{cis}$- oder des-Moll: $\underline{fis} - a - \underline{cis} - e - \underline{gis}$
   $as - \underline{c} - es$
6. $\underline{gis}$- oder as-Moll: $\underline{cis} - e - \underline{gis} - h - \underline{dis}$
   $es - \underline{g} - b$
7. $\underline{dis}$- oder es-Moll: $\underline{gis} - h - \underline{dis} - fis - \underline{ais}$
   $b - \underline{d} - f$
8. $\underline{ais}$- oder b-Moll: $\underline{dis} - fis - \underline{ais} - cis - \underline{eis}$
   $f - \underline{a} - c.$

Von diesen sind die sechs letzten Grundtöne Ces bis B auch gleichzeitig mit der Durtonleiter versehen. Vollständige Molltonleitern finden wir also auf allen Stufen der $\underline{h}$-Durtonleiter und $\underline{e}$-Durtonleiter; vollständige Moll- und Durskalen auf allen Stufen der $\underline{h}$-Durtonleiter, mit Ausnahme von $\underline{e}$.

Ich hatte bei vorläufigen Versuchen an einem anderen Harmonium, wo mir nur innerhalb einer zwei Registern gemeinsamen Oktave die doppelten Töne zu Gebote standen, erwartet, daß man es sehr wenig merken würde, wenn die übrigen Molltonarten entweder mit einer etwas zu hohen pythagoreischen Septime versehen oder vielleicht selbst die an sich schon etwas getrübten Mollakkorde in pythagoreischer Stimmung ausgeführt würden. Wenn man vereinzelte

Mollakkorde anschlägt, merkt man den Unterschied auch nur wenig. Aber wenn man sich durch längere Reihen rein gestimmter Akkorde bewegt. und das Ohr an deren Klang gewöhnt hat, so wird man gegen einzelne eingemischte unreinere so empfindlich, daß sie eine recht merkliche Störung hervorbringen.

Am wenigsten stört es noch, wenn wir die Septime, den Leitton, in pythagoreischer Stimmung nehmen, da diese, wenigstens in neueren Kompositionen, fast nur im Dominantseptimenakkord oder anderen dissonanten Akkorden vorkommt. In einem reinen Durakkord freilich klingt sie sehr hart. In einem dissonanten Akkord stört sie weniger, namentlich da durch die etwas höhere Lage ihre Natur als Leitton der Tonart mehr hervorgehoben wird. Dagegen habe ich Mollakkorde mit pythagoreischen Terzen entschieden unerträglich gefunden, wenn sie zwischen rein gestimmte Dur- und Mollakkorde eingemischt werden. Läßt man also die hohe Septime im Dominantseptimenakkord zu, so lassen sich noch folgende Molltonarten bilden:

9. *d*-Moll: *g — b — d — f — a — cis — e*
10. *g*-Moll: *c — es — g — b — d — fis — a*
11. *c*-Moll: *f — as — c — es — g — h — d*
12. *f*-Moll: *b — des — f — as — c — e — g*
13. *b*-Moll: *es — ges — b — des — f — a — c*
14. *es*-Moll: *as — ces — es — ges — b — d — f.*

In der vorigen Reihe hatten wir schon *b*- und *es*-Moll. So schließt sich die Reihe der Molltonarten auch wieder derartig zusammen, daß bei enharmonischer Verwechselung ihre Enden ineinander übergehen.

In den meisten Fällen lassen sich musikalische Sätze, welche man in diesem Stimmungssystem auszuführen wünscht, so transponieren, daß man nicht gezwungen ist, enharmonische Verwechselungen zu machen, wenn die Breite ihrer Modulationen zwischen verschiedenen Tonarten nicht zu groß ist. Kann man enharmonische Verwechselungen nicht vermeiden, so muß man sie an solche Stellen zu bringen suchen, wo zwei nicht verwandte Akkorde aufeinander folgen. Am besten sind sie zwischen dissonanten Akkorden zu machen. Natürlich muß mindestens eine enharmonische Verwechselung jedesmal gemacht werden, wo ein Satz durch den ganzen Quintenkreis herumgeht, von *C*-Dur also etwa bis *His*-Dur. Aber Hauptmann hat wohl recht, wenn er einen solchen Kreislauf der

Modulation als eine unnatürliche Künstelei betrachtet, die nur durch die Ungenauigkeit unseres Tonsystemes mit temperierter Stimmung überhaupt möglich ist. Ein solches Verfahren muß jedenfalls im Hörer das Gefühl für die Einheit der Tonika zerstören; denn wenn auch *His* der Tonhöhe nach dem *C* sehr nahe liegt, oder ihm unrechtmäßigerweise sogar ganz gleich gemacht wird, so kann im Hörer doch das Gefühl für die vorige Tonika nur dadurch wieder hergestellt werden, daß er die Modulationsschritte wieder zurück macht, die er anfangs vorwärts gemacht hatte. Die Erinnerung an die absolute Tonhöhe der ersten Tonika *C* kann er nach längeren Modulationen, wenn er in *His* angekommen ist, unmöglich noch so genau bewahren, daß er beide als gleich anerkennen könnte. Für ein feines künstlerisches Gefühl muß doch *His* immer eine Tonika sein, die fern ab von *C* auf dessen Dominantseite liegt; oder, was wahrscheinlicher ist, es wird bei einer so weiten Modulation gänzliche Verwirrung des Gefühles für die Tonalität eingetreten sein, und es wird nachher ganz gleichgültig sein, in welcher Tonart das Stück endet. Überhaupt ist der übermäßige Gebrauch frappanter Modulationen ein billiges und leicht zu handhabendes Mittel der neueren Tonsetzer, um ihre Sätze pikant und farbenreich zu machen. Aber von Gewürz kann man nicht leben, und die Folge des unruhigen Modulierens ist fast immer, daß der künstlerische Zusammenhang des Satzes aufgehoben wird. Man darf nicht vergessen, daß die Modulationen nur ein Mittel sein dürfen, um durch den Gegensatz das Beharren in der Tonika und die Rückkehr in diese hervorzuheben, oder um einzelne besondere Ausdruckseffekte zu erreichen.

Da die Instrumente mit zwei Manualen zu jedem Manual zwei besondere Zungenreihen zu haben pflegen, von denen für die bisher beschriebene Stimmung nur je eine in Anspruch genommen war, so habe ich die beiden anderen (ein 8füßiges und ein 16füßiges Register) auf die gewöhnliche Weise in gleichschwebender Temperatur stimmen lassen, wodurch die Vergleichung der Wirkungen dieser Stimmung und der reinen sehr leicht wird, indem man nur die Registerzüge umzustellen hat, um denselben Akkord in der einen oder anderen zu hören[1]).

[1]) Vorschläge zu Anordnungen, welche die Tonreihe dieses Stimmungssystemes vollständiger machen und die Spielart wesentlich erleichtern, indem sie nur ein Manual nötig machen, sind in Beilage XVII gegeben.

Was nun die musikalischen Wirkungen der reinen Stimmung betrifft, so ist der Unterschied zwischen dieser und der gleichschwebenden oder der griechischen Stimmung nach reinen Quinten doch sehr bemerklich. Die reinen Akkorde, namentlich die Durakkorde in ihren günstigen Lagen, haben trotz der ziemlich scharfen Klangfarbe der Zungentöne einen sehr vollen und gleichsam gesättigten Wohlklang; sie fließen in vollem Strom ganz ruhig hin, ohne zu zittern und zu schweben. Setzt man gleichschwebende oder pythagoreische Akkorde daneben, so erscheinen diese rauh, trübe, zitternd und unruhig. Der Unterschied ist groß genug, daß jeder, er mag musikalisch gebildet sein oder nicht, ihn gleich bemerkt. Septimenakkorde in reiner Stimmung ausgeführt, haben ungefähr denselben Grad von Rauhigkeit, wie ein gewöhnlicher Durakkord in gleicher Tonhöhe und temperierter Stimmung. Am größten und unangenehmsten ist die Differenz zwischen natürlichen und temperierten Akkorden in den höheren Oktaven der Skala, weil hier die falschen Kombinationstöne der temperierten Stimmung sich merklicher machen, und weil die Zahl der Schwebungen bei gleicher Tondifferenz größer wird, und die Rauhigkeit sich viel mehr verstärkt, als in tieferer Lage.

Ein zweiter Umstand von wesentlicher Wichtigkeit ist, daß die Unterschiede des Klanges zwischen Durakkorden und Mollakkorden, zwischen verschiedenen Umlagerungen der Akkorde gleicher Art, zwischen Konsonanzen und Dissonanzen viel entschiedener und deutlicher hervortreten, als in der gleichschwebenden Stimmung. Die Modulationen werden deshalb viel ausdrucksvoller, als sie es gewöhnlich sind. Manche feine Schattierungen werden fühlbar, die sonst fast verschwinden, namentlich die auf den Umlagerungen der Durakkorde beruhenden, während andererseits die Intensität der schärferen Dissonanzen durch den Kontrast mit den reinen Akkorden erheblich gesteigert wird. Der verminderte Septimenakkord z. B., der in der neuesten Musik so viel gebraucht wird, streift bei reiner Stimmung der übrigen Akkorde fast an die Grenze des Unerträglichen.

Die modernen Musiker, welche mit seltenen Ausnahmen niemals andere Musik gehört haben als solche, die in temperierter Stimmung ausgeführt ist, gehen meist sehr leicht über die Ungenauigkeiten der temperierten Stimmung hinweg. Die Ungenauigkeiten der Quinten sind sehr klein, das ist ganz richtig, und von den Terzen pflegt man

zu sagen, daß sie eine weniger vollkommene Konsonanz sind als die Quinte, und deshalb weniger empfindlich gegen Verstimmung als die Quinten. Das letztere ist wieder richtig, solange es auf einstimmige Musik beschränkt wird, in welcher die Terzen nur als melodische Intervalle vorkommen, nicht als harmonische. In einem konsonierenden Dreiklang aber ist jeder Ton gleich empfindlich gegen Verstimmung, wie Theorie und Erfahrung übereinstimmend zeigen, und der schlechte Klang der temperierten Dreiklänge beruht wesentlich auf den unreinen Terzen.

Darüber kann keine Frage sein, daß das System der temperierten Stimmung durch seine Einfachheit ganz außerordentliche Vorzüge für die Instrumentalmusik hat, daß jedes andere System einen außerordentlich viel komplizierteren Mechanismus der Instrumente bedingen und ihre Handhabung beträchtlich erschweren würde, und daß daher die hohe Ausbildung der modernen Instrumentalmusik nur unter der Herrschaft des temperierten Stimmungssystemes möglich geworden ist. Aber man muß nicht glauben, daß der Unterschied zwischen dem temperierten und dem natürlichen System eine mathematische Spitzfindigkeit sei, die keinen praktischen Wert habe. Daß dieser Unterschied auch für die Ohren selbst wenig musikalischer Leute auffallend genug ist, zeigt die wirkliche Beobachtung an einem passend gestimmten Instrument augenblicklich. Daß übrigens die älteren Musiker, welche noch an die reinen Intervalle des damals sehr sorgfältig eingeübten Gesanges gewöhnt waren, ebenso fühlten, sieht man sogleich, wenn man einen Blick auf musikalische Schriften aus der zweiten Hälfte des 17. und der ersten des 18. Jahrhunderts wirft, in welcher Zeit über die Einführung der temperierten Stimmungen verschiedener Art hin und her gestritten wurde, wo man Methoden über Methoden ausdachte und wieder verwarf, um der Schwierigkeit zu entgehen, und die künstlichsten Formen für Instrumente ersann, um die enharmonischen Unterschiede der Tonstufen praktisch ausführen zu können. Praetorius[1]) berichtet von einem Universalklavicymbel, welches er bei Kaiser Rudolphs II. Hoforganisten in Prag sah, und das in 4 Oktaven 77 Klaves hatte, also 19 in der Oktave, indem nicht nur die Obertasten alle verdoppelt waren, sondern auch noch

[1]) Syntagma musicum, II, Cap. XI, p. 63.

zwischen *e* und *f*, sowie zwischen *h* und *c* Töne eingeschoben waren. In den älteren Stimmungsvorschriften wurde eine Anzahl Töne gewöhnlich nach Quinten gestimmt, die etwas unter sich schwebten, dazwischen andere als reine große Terzen. Die Intervalle, auf welche die Fehler sich zusammenhäuften, hießen die Wölfe. Praetorius sagt: „es ist zum Besten, daß der Wolf mit seinem widrigen Heulen im Walde bleibe und unsere *harmonicas concordantias* nicht interturbiere". Auch Rameau, der später am meisten zur Einführung der gleichschwebenden Temperatur beigetragen hat, verteidigte im Jahre 1726[1]) noch eine andere Art der Stimmung, bei welcher die Terzen der gebräuchlicheren Tonarten auf Kosten der Quinten und auf Kosten der ungebräuchlicheren Tonarten rein gehalten wurden. Man stimmte nämlich von *C* aus in Quinten aufwärts, die man aber zu klein machte, so daß die vierte Quinte, statt *E* zu sein, die reine Terz von *C*, nämlich $\underline{E} = Fes$ wurde. Dann ebenso weiter, bis die vierte Quinte statt auf *As* auf $\underline{As}$, die reine Terz des *Fes* fiel. Die vier Quinten zwischen diesem $\underline{As}$ und *C* mußte man aber notwendig zu groß machen, weil nicht $\underline{As}$, sondern *As* um vier reine Quintenstufen von *C* entfernt ist. Diese Stimmung gibt rein die Terzen $C-\underline{E}$, $G-\underline{H}$, $D-\underline{Fis}$, $E-\underline{Gis}$, wenn man aber von *E* nach der Oberdominantseite weiter geht, oder von *C* nach der Unterdominantseite, findet man Terzen, die immer schlechter und schlechter werden; der Fehler der Quinten ist etwa dreimal so groß als in der temperierten Stimmung. Dieses System konnte d'Alembert noch 1762 als das gewöhnlich in Frankreich gebrauchte bezeichnen gegenüber dem gleichschwebenden, welches Rameau später vorgeschlagen hatte. Eine lange Reihe anderer Stimmungssysteme findet man bei Marpurg[2]) aufgezählt. Da man sich nun einmal beim Gebrauch solcher Instrumente, die nur 12 Töne in der Oktave haben, dazu genötigt sah, eine Reihe falscher Intervalle zu ertragen, und sich an diese gewöhnen mußte, so war es freilich besser, wenn man sich entschloß, die wenigen reinen Terzen, die man noch in der Skala hatte, ganz aufzugeben und alle Intervalle gleicher Art gleich unrein zu machen. Natürlich stört es viel mehr, wenn man neben reinen Intervallen sehr verstimmte zu hören bekommt, als wenn alle mittelmäßig verstimmt

[1]) Nouveau Système de Musique, Cap. XXIV.

[2]) Versuch über die musikalische Temperatur. Breslau 1776.

sind, und der Kontrast der reinen Intervalle ganz fortfällt. Über den Vorzug der gleichschwebenden Temperatur vor den anderen sogenannten ungleichschwebenden Temperaturen kann also kein Zweifel sein, sobald man sich praktisch auf 12 Tonstufen innerhalb der Oktave beschränken muß, und so ist diese Stimmungsweise schließlich auch die allein herrschende geworden. Nur die Streichinstrumente mit ihren vier reinen Quinten $C — G — D — A — E$ weichen noch davon ab.

In Deutschland fing man noch früher als in Frankreich an, die gleichschwebende Temperatur zu gebrauchen. Matheson in dem 1725 erschienenen zweiten Band seiner *Critica Musica* nennt Neidhard und Werckmeister als die Erfinder dieser Temperatur[1]). Sebastian Bach hat sie für das Klavier schon angewendet, wie man aus einer von Marpurg berichteten Äußerung Kirnbergers schließen muß, welcher sagt, als Schüler vom älteren Bach habe er dessen Klavier stimmen und sämtliche Terzen etwas zu hoch machen müssen. Sebastians Sohn Emanuel, der als Klavierspieler berühmt war und 1753 ein seinerzeit maßgebendes Werk „über die wahre Art, das Klavier zu spielen", herausgegeben hat, verlangt für dieses Instrument durchaus die gleichschwebende Temperatur.

Die älteren Versuche, mehr als 12 Tonstufen in die Skala einzuführen, haben nichts Brauchbares ergeben, weil sie von keinem richtigen Prinzip ausgingen. Sie schlossen sich immer an das griechische System des Pythagoras an, und glaubten, es komme nur darauf an, zwischen *cis* und *des*, zwischen *fis* und *ges* usw. einen Unterschied zu machen. Das genügt aber keineswegs und ist auch nicht immer richtig. Nach unserer Bezeichnungsweise läßt sich *cis* dem *des* gleich setzen, aber wir müssen das durch Quinten gefundene *cis* von dem durch ein Terzverhältnis gefundenen *cis* unterscheiden. Deshalb haben jene Versuche mit Instrumenten von zusammengesetzteren Tastaturen bisher kein Resultat erzielt, welches der darauf verwendeten Mühe und der Erschwerung des Spieles entsprochen hätte. Das einzige derartige Instrument, welches jetzt noch gebraucht wird,

[1]) S. 162 des angeführten Werkes. Ich finde bei Forkel folgende Werke beider Autoren angeführt: Neidhard, Königl. Preußischer Kapellmeister, Die beste und leichteste Temperatur des Monochordi. Jena 1706. Sectio canonis harmonici. Königsberg 1724. Werckmeister, Organist zu Quedlinburg, geb. 1645, Musikalische Temperatur. Frankfurt und Leipzig 1691.

ist die Pedalharfe *à double mouvement*, an der man durch Fußtritte die Stimmung ändern kann.

Außer der Gewöhnung und dem Mangel eines Vergleiches mit reineren Intervallen kommen dem Gebrauch der gleichschwebenden Temperatur noch einige andere Umstände zu Hilfe.

Zunächst ist nämlich zu bemerken, daß die Störungen in der temperierten Skala, welche von Schwebungen abhängen, desto weniger merklich sind, je schneller die Bewegung und je kürzer die Dauer der einzelnen Noten ist. Wenn die Note so kurz ist, daß nur einige wenige Schwebungen während ihrer Dauer zustande kommen können, so hat das Ohr nicht Zeit, deren Anwesenheit zu bemerken. Die Schwebungen, welche ein temperierter Durdreiklang hervorruft, sind folgende:

1. Schwebungen der temperierten Quinte. Setzen wir die Schwingungszahl von $a' = 440$, demgemäß die von $c' = 264$, so gibt die temperierte Quinte $c' - g'$ in der Sekunde $1^1/_9$ Schwebung, teils mittels der Obertöne, teils mittels der Kombinationstöne. Diese Schwebungen sind in allen Fällen gut hörbar.

2. Schwebungen der beiden ersten Kombinationstöne von $c' - e'$ und $e' - g'$ bei temperierter Stimmung; ihre Anzahl ist $5^2/_3$ in der Sekunde. Diese sind bei allen Klangfarben deutlich hörbar, wenn die Tonstärke nicht zu klein ist.

3. Schwebungen der großen Terz $c' - e'$ allein, $10^1/_2$ in der Sekunde, aber nur bei scharfen Klangfarben mit starken Obertönen deutlich hörbar.

4. Schwebungen der kleinen Terz $e - g$, 17 in der Sekunde, die aber meist viel schwächer als die der großen Terz sein werden, ebenfalls nur in scharfen Klangfarben deutlich.

Alle diese Schwebungen werden doppelt so schnell, wenn man den Akkord eine Oktave höher legt, halb so schnell, wenn man ihn eine Oktave tiefer legt.

Von diesen Schwebungen haben die ersten, die der temperierten Quinte, am wenigsten nachteiligen Einfluß auf den Wohlklang. Sie sind so langsam, daß man sie in den mittleren Teilen der Skala nur bei lang aushallenden Noten überhaupt hören kann; dann bringen sie das langsame Wogen des Akkordes hervor, welches unter Umständen sich sehr gut machen kann. Am auffallendsten ist bei den milderen Klangfarben die zweite Art der Schwebungen. Nun kommen im *Allegro* $^4/_4$ Takt etwa 2 Takte auf 3 Sekunden. Wird der Drei-

klang $c' - e' - g'$ temperiert gestimmt als Viertelnote in diesem Takt angegeben, so kann man von den genannten Schwebungen $2^1/_8$ hören; also wenn der Ton schwach anfängt, wird er schwellen, wieder abnehmen, noch einmal schwellen, abnehmen und dann zu Ende sein. Das wird in einem schnellen, unruhigen Tempo kaum eine Störung machen. Schlimmer wird es freilich, wenn ein solcher Akkord ein oder zwei Oktaven höher angegeben wird, und auf dieselbe Dauer der Note nun $4^1/_4$ oder $8^1/_2$ Schwebungen kommen, welche das Ohr dann schon als eine scharfe Rauhigkeit aufzufassen Zeit hat.

Aus demselben Grunde sind nun die Schwebungen dritter und vierter Art, die der Terzen, wo sie in scharfen Klangfarben deutlich hervortreten, auch in mittlerer Lage und in schnellem Tempo ziemlich störend und beeinträchtigen die Ruhe des Wohlklanges sehr wesentlich, da ihre Zahl zweimal und dreimal größer ist, als die der vorigen. Nur in weichen Klangfarben bemerkt man sie wenig, oder wenn man sie bemerkt, so sind sie überdeckt von viel stärkeren, ruhig fortklingenden Tönen, so daß sie dann nur wenig hervortreten.

Bei schnell wechselnden Noten, weicher Klangfarbe, mäßiger Intensität des Tones kommen also allerdings die Übelstände der temperierten Stimmung wenig zum Vorschein. Nun ist aber fast alle Instrumentalmusik auf schnelle Bewegung berechnet; daß ihr diese möglich ist, darin liegt ihr wesentlicher Wert der Vokalmusik gegenüber. Man könnte freilich auch die Frage aufwerfen, ob die Instrumentalmusik in diese Richtung auf schnelle Bewegung nicht auch einseitig dadurch hineingedrängt ist, daß sie bei ihrer temperierten Stimmung den vollen Wohlklang getragener Akkorde nicht in solchem Maße erreichen kann, wie gut geschulte Sänger, und sie deshalb auf diese Seite der Musik verzichten mußte.

Die temperierte Stimmung hat sich zuerst und vorzugsweise an den Klavieren entwickelt, erst von da ist sie allmählich auf die übrigen Instrumente übertragen worden. Am Klavier sind nun in der Tat die Verhältnisse besonders günstig, um ihre Mängel zu überdecken. Die Klaviertöne haben nämlich nur im ersten Augenblick, unmittelbar nach dem Anschlag, eine große Stärke, die aber schnell sich vermindert. Ich habe schon früher erwähnt, daß deshalb auch ihre Kombinationstöne nur im ersten Augenblick vorhanden und sehr schwer zu hören sind. Die Schwebungen, welche von den Kom-

binationstönen abhängen, fallen deshalb ganz weg. Die Schwebungen dagegen, welche von den Obertönen abhängen, hat man auf den neueren Klavieren gerade in den höheren Oktaven, wo sie am leichtesten nachteilig werden, dadurch beseitigt, daß man die Obertöne der Saiten durch die Art des Anschlages sehr abgeschwächt und die Klangfarbe sehr weich gemacht hat, wie ich das in dem fünften Abschnitt auseinander gesetzt habe. Daher sind auf dem Klavier die Mängel der Stimmung viel weniger zu bemerken, als auf irgend einem anderen Instrument mit ausgehaltenen Tönen, und doch fehlen sie nicht. Wenn ich von meinem rein gestimmten Harmonium zu einem Flügel hinübergehe, klingt auf dem letzteren alles falsch und beunruhigend, namentlich, wenn ich einzelne Akkordfolgen anschlage. In schnell bewegten melodischen Figuren und harpeggierten Akkorden ist es weniger unangenehm. Die älteren Musiker empfahlen daher die gleichschwebende Temperatur hauptsächlich nur für das Klavier. Matheson, indem er dies tut, erkennt für Orgeln die Vorzüge der Silbermannschen ungleichschwebenden Temperatur an, in welcher die gewöhnlich gebrauchten Tonarten reiner gehalten sind. Emanuel Bach sagt, daß ein richtig gestimmtes Klavier das reinste unter allen Instrumenten sei, was in dem angeführten Sinn ganz richtig ist. Durch die große Verbreitung und Bequemlichkeit des Klaviers ist es später das Hauptinstrument für das Studium der Musik geworden und seine Stimmung das Muster für die übrigen Instrumente.

Dagegen sind bei den scharfen Orgelregistern, namentlich bei den Mixturen und Zungenwerken, die Mängel der temperierten Stimmung außerordentlich auffallend. Man hält es gegenwärtig für unvermeidlich, daß die Mixturregister, vollstimmig gespielt, einen Höllenlärm machen, und die Orgelspieler haben sich in ihr Schicksal gefügt. Das ist aber der Hauptsache nach nur durch die gleichschwebende Temperatur bedingt, weil man die Quinten und Terzen zwischen den Pfeifen, die derselben Taste angehören, notwendig rein stimmen muß, sonst gibt jede einzelne Note des Registers schon Schwebungen. Wenn nun die Quinten und Terzen zwischen den Noten der verschiedenen Tasten gleichschwebend gestimmt sind, so kommen in jedem Akkord reine Quinten und Terzen mit gleichschwebenden gleichzeitig vor, wodurch ein ganz unruhiger und schwirrender Zusammenklang entsteht. Und gerade bei der Orgel wäre es so sehr

leicht, durch wenige Registerzüge das Werk für jede Tonart einzustimmen, um volle wohlklingende Konsonanzen zu erhalten[1]).

Wer nur einmal den Unterschied zwischen rein gestimmten und temperierten Akkorden gehört hat, wird nicht zweifeln, daß es für eine große Orgel der größte Gewinn wäre, wenn man die Hälfte ihrer Register, deren Unterschiede oft genug auf eine Spielerei hinauslaufen, striche und dafür die Zahl der Töne innerhalb der Oktave verdoppelte, um mit Hilfe passender Registerzüge in jeder Tonart rein spielen zu können.

Ähnlich wie auf der Orgel verhält es sich auf dem Harmonium. Die falschen Kombinationstöne der temperierten Stimmung und die zitternden Akkorde sind jedenfalls der Grund, weshalb viele Musiker diese Instrumente als falsch klingend und nervös aufregend von der Hand weisen.

Die Orchesterinstrumente können ihre Tonhöhe meist ein wenig verändern. Die Streichinstrumente sind ganz frei in ihrer Intonation, die Blasinstrumente können durch schärferes oder schwächeres Blasen den Ton ein wenig in die Höhe treiben oder sinken lassen. Sie sind zwar alle auf temperierte Stimmung berechnet, aber gute Spieler haben die Mittel, den Forderungen des Ohres einigermaßen nachzugeben. Daher klingen Terzengänge auf Blasinstrumenten, von mittelmäßigen Musikern ausgeführt, oft genug verzweifelt falsch, während sie von gut gebildeten Spielern mit feinem Ohr ausgeführt, vollkommen gut klingen können.

Eine eigentümliche Sache ist es mit den Streichinstrumenten. Diese haben seit alter Zeit noch die Stimmung ihrer Saiten nach reinen Quinten beibehalten. Die Violine allein hat die reinen Quinten $G — D — A — E$. Bratsche und Cello geben noch die Quinte $C — G$ dazu. Nun hat jede Tonleiter auch ihren besonderen Fingersatz, und es könnte daher wohl jeder Schüler sich so einüben, daß er jeder Tonart ihre eigene Leiter gäbe, wobei allerdings die gleichnamigen Töne verschiedener Leitern nicht gleich gegriffen werden dürften, und auch die Terz der *C-Dur*-Leiter, wenn man die leere *C*-Saite der Bratsche als Grundton nähme, nicht auf der leeren *E*-Saite der Violine gespielt werden dürfte, weil diese E gibt, nicht $\underline{E}$. Indessen gehen die neueren Violinschulen seit Spohr meist darauf aus, die Stufen der gleichschwebenden Temperatur hervorzubringen, obgleich

[1]) Über rein gestimmte Orgeln von H. W. Poole (Sillimans American Journ. of Science 1850 u. 1867) und von P. Thompson s. Beilage XVIII.

dies vollständig schon wegen der reinen Quinten der leeren Saiten gar nicht möglich ist. Jedenfalls aber ist die bewußte Absicht der meisten gegenwärtig lebenden Violinspieler die, nur 12 Tonstufen in der Oktave zu unterscheiden. Eine einzige Ausnahme geben sie zu, daß man nämlich bei Doppelgriffen die Töne häufig etwas anders greifen müsse, als wenn man sie einzeln angibt. Aber diese Ausnahme ist entscheidend. Bei Doppelgriffen fühlt sich der einzelne Spieler verantwortlich für den Wohlklang des Intervalles, und hat es vollkommen in seiner eigenen Gewalt, die Konsonanz gut oder schlecht zu machen. Da zieht er es vor, sie rein zu machen. Jeder Violinspieler wird sich leicht von folgenden Tatsachen überzeugen können. Nachdem die Saiten einer Violine in reinen Quinten $G — D — A — E$ gestimmt sind, suche er auf der A-Saite die Stelle, wo der Finger aufgesetzt werden muß, um dasjenige H zu erhalten, welches die reine Quartenkonsonanz $H — E$ gibt. Nur streiche er bei unverändertem Fingersatz dieses selbe H mit der D-Saite zusammen an. Das Intervall $D — H$ wäre nach gewöhnlicher Betrachtungsweise eine große Sexte, aber eine pythagoreische. Um die konsonante Sexte $D — \underline{H}$ zu erhalten, muß der Spieler mit seinem Finger um eine Strecke von $1^{3}/_{5}$ Pariser Linien zurückgehen, eine Distanz, die man beim Fingersatz sehr wohl berücksichtigen kann, und die die Tonhöhe sowohl als namentlich die Schönheit der Konsonanz sehr merklich verändert.

Es ist aber klar, daß, wenn sich der einzelne Spieler verpflichtet fühlt, die verschiedenen Werte der Noten in den verschiedenen Konsonanzen zu unterscheiden, gar kein Grund dazu da ist, im Quartettspiel die schlechten Terzen der pythagoreischen Quintenfolge beibehalten zu wollen. Mehrstimmige Akkorde von mehreren Spielern im Quartett ausgeführt, klingen oft recht schlecht, während jeder einzelne von diesen Spielern Solosachen ganz hübsch und angenehm vorzutragen imstande ist; und doch kann man andererseits in den Quartetts, welche von sehr fein ausgebildeten Spielern vorgetragen werden, in der Regel nicht behaupten, daß falsche Konsonanzen vorkämen. Ich meine nun, die einzige Erklärung davon ist die, daß geübte Spieler von feinem musikalischen Sinn auf der Violine diejenigen Töne zu greifen wissen, die sie hören wollen, und dabei nicht an die Regeln einer unvollkommenen Schule gebunden sind.

Daß solche Spieler ersten Ranges in der Tat nach natürlichen Intervallen spielen, wird durch die sehr interessanten und genauen Versuche von Delezenne[1]) direkt erwiesen. Dieser bestimmte die Werte der einzelnen Noten der Durskala, wie sie ausgezeichnete Violinisten und Violoncellisten ausführten, an einer genau eingeteilten Saite, und fand, daß solche Spieler genau in natürlichen Terzen und Sexten, nicht in temperierten oder pythagoreischen spielten. Ich hatte die glückliche Gelegenheit, Versuche gleicher Art an meinem Harmonium mit Herrn Joachim anzustellen; derselbe stimmte die Saiten seiner Violine übereinstimmend mit dem $g - d - a - e$ meines Instrumentes. Ich bat ihn alsdann, die Skala zu spielen, und gab, sobald er die Terz oder Sexte eingesetzt hatte, den entsprechenden Ton auf dem Harmonium an. Mittels der Schwebungen war leicht zu erkennen, daß der genannte ausgezeichnete Musiker $\underline{h}$ und nicht h als Terz zu g brauchte, $\underline{e}$ und nicht e als Sexte[2]). Wenn aber auch Virtuosen, welche die zu spielenden Stücke genau kennen, imstande sind, die Mängel ihrer Schule und des temperierten Systemes zu überwinden, so würde es doch Talenten zweiten Ranges außerordentlich erleichtert werden, zu einem vollendeten Zusammenspiel zu gelangen, wenn man sie von Anfang an gewöhnte, die Tonleitern nach natürlichen Intervallen zu spielen, und die größere Mühe der ersten Übungen würde durch die späteren Resultate reichlich gelohnt werden. Übrigens

---

[1]) *Recueil des travaux de la Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille, 1826 et premier semestre 1827. Mémoire sur les valeurs numériques des notes de la gamme par* M. Delezenne. Beobachtungen über die entsprechenden Verhältnisse beim Gesang siehe unten in Beilage XVIII.

[2]) Die Herren Cornu und Mercadier haben kürzlich entgegenstehende Beobachtungen veröffentlicht. (Comptes rendus de l'Acad. des Sciences. Paris 8 et 22 Février 1869.) Sie ließen Musiker die Terz eines Durakkordes abstimmen, bald in melodischer Folge, bald in harmonischem Zusammenklang. In letzterem Falle wählte man immer die Terz 4 : 5. Aber wenn die Beobachter in melodischer Folge der Töne stimmten, wählten sie eine etwas höhere Terz. Ich muß dagegen erwidern, daß in melodischer Folge genommen die Terz überhaupt kein sehr sicher charakterisiertes Intervall ist, und daß alle neueren Musiker durch die Klaviere an zu hohe Terzen gewöhnt sind. Ich finde es in der Folge $c - e - g$ allein, isoliert von anderen Teilen der Skala, schwer, zwischen der natürlichen und pythagoreischen Terz mit Bestimmtheit zu wählen. Wenn ich aber eine vollständige Melodie eines mir wohlbekannten Liedes einstimmig auf dem Harmonium spiele, so finde ich, daß pythagoreische Terzen immer angestrengt, natürliche beruhigend und weich klingen. Nur im Leitton ist es vielleicht ausdrucksvoller, die höhere Terz zu nehmen.

ist es viel leichter, die Unterschiede in der natürlichen Stimmung gleich benannter Noten aufzufassen, als man gewöhnlich glaubt, sobald man sich einmal an den Klang der reinen Konsonanzen gewöhnt hat. Eine Verwechselung von $\underline{a}$ und a auf meinem Harmonium in einem konsonanten Akkord fällt mir ebenso schnell und so sicher auf, als auf dem Fortepiano eine Verwechselung von A und As.

Ich kenne allerdings die Technik des Violinspieles zu wenig, als daß ich es wagen könnte, hier Vorschläge zu einer definitiven Regelung des Tonsystemes für die Streichinstrumente zu geben. Das muß Meistern dieser Instrumente, die gleichzeitig die Fähigkeiten eines Komponisten haben, überlassen bleiben. Solche werden sich auch durch das Zeugnis ihrer Ohren leicht von der Richtigkeit der angegebenen Tatsachen überzeugen können und einsehen, daß es sich hier nicht um unnütze mathematische Spekulationen, sondern um praktisch sehr wichtige Fragen handelt.

Ähnlich verhält es sich mit den jetzigen Sängern. Im Gesang ist die Intonation vollkommen frei, während auf den Streichinstrumenten wenigstens die fünf Töne der leeren Saiten eine unveränderliche Tonhöhe haben. Im Gesang kann die Tonhöhe am allerleichtesten und vollkommensten den Wünschen eines feinen musikalischen Gehöres folgen. Deshalb ist auch alle Musik vom Gesang ausgegangen, und der Gesang wird wohl immer die wahre und natürliche Schule aller Musik bleiben müssen. Der Sänger kann nur solche Tonverhältnisse rein und sicher treffen, die das Ohr rein und sicher auffaßt, und was der Sänger daher leicht und natürlich singt, wird auch der Hörer leicht und natürlich zu verstehen finden.

Bis zum 17. Jahrhundert wurden die Sänger nach dem Monochord eingeübt, für welchen Zarlino in der Mitte des 16. Jahrhunderts die richtige natürliche Stimmung wieder einführte. Die Einübung der Sänger geschah in jener Zeit mit einer Sorgfalt, von der wir gegenwärtig freilich keine Idee haben. Auch kann man es noch jetzt der italienischen Kirchenmusik des 15. und 16. Jahrhunderts ansehen, daß sie auf den reinsten Wohlklang der Konsonanzen berechnet ist, und daß ihre ganze Wirkung zerstört wird, sobald diese in ungenügender Reinheit ausgeführt werden.

Man kann nun nicht verkennen, daß gegenwärtig selbst von unseren Opernsängern nur wenige imstande sind, einen kleinen mehr-

stimmigen Satz, der entweder gar keine Begleitung hat oder nur sparsam durch wenige Akkorde begleitet ist, wie z. B. das Maskenterzett in Mozarts Don Giovanni, so zu singen, daß der Hörer die volle Freude an dem reinen Wohlklang haben könnte. Die Akkorde klingen fast immer ein wenig scharf und unsicher, so daß sie einen musikalischen Hörer beunruhigen. Wo sollen aber auch unsere Sänger lernen, rein zu singen und ihr Ohr für den Wohlklang reiner Akkorde empfindlich zu machen? Sie werden von Anfang an geübt, an dem gleichschwebend gestimmten Klavier zu singen. Wird ihnen als Begleitung ein Durakkord angegeben, so können sie sich entweder mit dessen Grundton, oder mit dessen Quinte, oder mit dessen Terz in Konsonanz setzen. Es bleibt ihnen dabei ein Spielraum von fast einem Fünftel eines Halbtones, innerhalb dessen ihre Stimme herumirren kann, ohne gerade entschieden die Harmonie zu verlassen, und selbst wenn sie noch ein wenig höher geht, als die Konsonanz mit der zu hohen Terz verlangt, oder ein wenig tiefer, als die Konsonanz mit der zu tiefen Quinte verlangt, so wird der Wohlklang des Akkordes noch nicht gerade viel schlechter werden. Der Sänger, welcher sich an einem temperierten Instrument einübt, hat gar kein Prinzip, nach welchem er die Tonhöhe seiner Stimme sicher und genau abmessen könnte[1]).

Andererseits hört man oft, daß vier musikalische Dilettanten, die sich viel miteinander eingeübt haben, vollkommen rein klingende Quartetts singen. Ja, ich möchte nach meiner eigenen Erfahrung fast behaupten, daß man Quartetts öfter vollkommen rein von jungen Männern hört, welche wenig oder gar nichts anderes singen, als diese ihre vierstimmigen Lieder, sich aber darin oft und regelmäßig üben, als wenn man sie von geschulten Solosängern hört, welche an die Begleitung des Klaviers oder des Orchesters gewöhnt sind. Reinheit des Gesanges ist aber so sehr die allererste und oberste Bedingung seiner Schönheit, daß ein rein ausgeführter Gesang selbst von einer schwachen und wenig geläufigen Stimme immer angenehm klingt, während die klangvollste und geübteste Stimme den Hörer beleidigt, wenn sie detoniert oder in die Höhe treibt.

Es verhält sich hier gerade so, wie mit den Streichinstrumenten. Die Schulung unserer jetzigen Sänger nach der Begleitung tempe-

[1]) Siehe Beilage XVIII.

rierter Instrumente ist ungenügend, aber gute musikalische Talente können sich schließlich durch Übung selbst auf die rechte Bahn helfen und die Fehler der Schule überwinden; ja, es gelingt ihnen dies vielleicht um so eher, je weniger sie in diese Schule gegangen sind, obgleich ich natürlich andererseits nicht leugnen will, daß die Geläufigkeit des Gesanges und die Beseitigung von allerlei natürlichen Unarten nur in der Schule gewonnen werden kann.

Offenbar ist es aber gar nicht nötig, diejenigen Instrumente, an denen der Sänger seine Übungen durchmacht, temperiert zu stimmen. Für solche Übungen genügt eine einzige Tonart, die richtig gestimmt ist. Man braucht nicht auf demselben Klavier, welches für den Gesangunterricht gebraucht wird, auch noch Sonaten spielen zu wollen. Besser wird es freilich sein, den Sänger an einer rein gestimmten Orgel (oder Harmonium) sich üben zu lassen, wo man dann mit Hilfe zweier Tastaturen auch alle Tonarten benutzen kann. Getragene Töne als Begleitung sind deswegen namentlich vorzuziehen, weil der Sänger selbst, sowie er die richtige Tonhöhe auch nur wenig verändert, sogleich Schwebungen zwischen den Tönen seiner Stimme und denen des Instrumentes hört. Man mache ihn auf diese Schwebungen aufmerksam, und er wird darin ein Mittel haben, um selbst auf das allerschärfste seine eigene Stimme kontrollieren zu können. Es ist dies an dem rein gestimmten Harmonium, wie ich mich durch den Versuch überzeugt habe, ganz leicht. Nur wenn der Sänger selbst jede kleinste Abweichung von der richtigen Tonhöhe sogleich durch ein auffallendes Phänomen angekündigt hört, wird es ihm möglich sein, die Bewegungen seines Kehlkopfes und die Spannungen seiner Stimmbänder so fein einzuüben, daß er nun auch mit voller Sicherheit den Ton hervorbringt, den sein Ohr verlangt. Wenn man eine feine Einübung von den Muskeln des menschlichen Körpers, hier also von denen des Kehlkopfes, verlangt, muß man eben auch sichere Mittel haben, um wahrzunehmen, ob das Ziel richtig erreicht ist. Und ein solches Mittel geben die Schwebungen für die Stimme ab, wenn man in getragenen reinen Akkorden begleitet. Temperierte Akkorde aber, die selbst Schwebungen geben, sind dazu gänzlich unbrauchbar.

Endlich ist, wie ich glaube, ein Einfluß der temperierten Stimmung auf die Kompositionsweise nicht zu verkennen. Zunächst ist dieser Einfluß günstig gewesen; er hat bewirkt, daß die Komponisten

wie die Spieler sich mit der größten Leichtigkeit in den verschiedensten Tonarten bewegen können, daß ein Reichtum der Modulationen möglich wurde, der früher nicht existiert hat. Andererseits aber ist nicht zu verkennen, daß die veränderte Stimmung zu einem solchen Reichtum von Modulationen auch zwang. Denn da der Wohlklang der konsonanten Akkorde nicht mehr ganz rein war, die Unterschiede zwischen ihren verschiedenen Umlagerungen verwischt wurden, mußte man durch stärkere Mittel, durch reichlichen Gebrauch scharfer Dissonanzen, durch ungewöhnlichere Modulationen zu ersetzen suchen, was die der Tonart selbst angehörigen Harmonien an charakteristischem Ausdruck verloren hatten. Daher bilden in manchen neueren Kompositionen dissonante Septimenakkorde schon die Mehrzahl der Akkorde und konsonante Akkorde die Ausnahme, während niemand zweifeln wird, daß es umgekehrt sein sollte, und die fortdauernden kühnen Modulationssprünge drohen das Gefühl für die Tonalität ganz zu zerstören. Es sind dies mißliche Symptome für die weitere Entwickelung der Kunst. Der Mechanismus der Instrumente und die Rücksicht auf seine Bequemlichkeit droht Herr zu werden über das natürliche Bedürfnis des Ohres, und droht das Stilprinzip der neueren Kunst, die feste Herrschaft der Tonika und des tonischen Akkordes wieder zu zerstören. Unter unseren großen Komponisten stehen Mozart und Beethoven noch am Anfang derjenigen Periode, wo die Herrschaft der gleichschwebenden Temperatur beginnt. Mozart hat noch Gelegenheit gehabt, reiche Studien in Gesangskompositionen zu machen. Er ist Meister des süßesten Wohllautes, wo er ihn haben will, aber er ist darin auch fast der letzte. Beethoven hat mit kühner Gewalt Besitz ergriffen von dem Reichtum, den die ausgebildete Instrumentalmusik hervorbringen konnte, seinem gewaltigen Willen war sie das gefügsame und zu allem bereite Werkzeug, in welches er eine Gewalt der Bewegung zu legen wußte, wie vor ihm keiner. Die menschliche Stimme aber hat er als dienende Magd behandelt, und deshalb hat sie ihm auch nicht mehr die höchsten Zauber ihres Wohlklanges gespendet.

Und bei alledem weiß ich nicht, ob es denn so notwendig gewesen ist, der Bequemlichkeit der Instrumentalmusik die Reinheit der Stimmung zu opfern. Sobald die Violinisten ihre Tonleitern nach richtiger Stimmung der jedesmaligen Leiter zu spielen sich ent-

schließen, was kaum erhebliche Schwierigkeiten machen kann, werden auch die übrigen Orchesterinstrumente so viel nachgeben können, daß sie sich der richtigeren Stimmung der Violinen anschließen. Überdies haben unter diesen die Hörner und Trompeten schon die natürliche Stimmung.

Übrigens ist hier noch zu bemerken, daß, wenn man bei Modulationen das natürliche System zugrunde legt, auch schon bei verhältnismäßig einfachen modulatorischen Wendungen enharmonische Verwechselungen eintreten müssen, welche im temperierten System nicht als solche erscheinen.

Es scheint mir wünschenswert, daß die neue Tonika, zu der man übergehen will, der Tonika, in welcher man sich befindet, verwandt sein muß; je näher, desto weniger auffallend ist der Übergang. Ferner wird es nicht ratsam sein, lange in einer Tonart zu verweilen, deren Tonika nicht nahe verwandt ist mit der Haupttonika des Satzes. Damit stimmen auch im ganzen die gewöhnlich gegebenen Regeln der Modulation überein. Die leichtesten und gewöhnlichsten Übergänge geschehen bekanntlich in die Tonart der Dominante und Subdominante, welche beide Töne in der Tat die nächsten Verwandten der ersten Tonika sind. Wenn also *C* die Haupttonart ist, so kann man unmittelbar in *G-Dur* übergehen, wobei die Töne *F* und *A* der *C*-Durleiter in *Fis* und *A* verwandelt werden. Oder man kann in *F-Dur* übergehen, indem man *H* und *D* mit *B* und *D* vertauscht. Nachdem dieser Schritt gemacht ist, wird häufig zu einer Tonart übergegangen, deren Tonika mit *C* nur im zweiten Grade verwandt ist, also von *G* nach *D*, oder von *F* nach *B*. Wenn man aber weiter in dieser Weise fortmodulieren wollte, würde man zu Tonarten kommen, *A* und *Es*, deren Zusammenhang mit der ursprünglichen Tonika *C* nur noch sehr undeutlich wäre, und in denen es jedenfalls nicht ratsam sein möchte, lange zu verweilen, wenn man nicht das Gefühl für die Haupttonart zu sehr schwächen will.

Andererseits kann man von der Haupttonika *C* aus auch zu ihren Terzen und Sexten fortschreiten, nach *E* und *A*, oder *Es* und *As*. In der temperierten Stimmung erscheinen diese Schritte identisch mit dem Übergang durch *G* und *D* nach *A* und *E*, oder durch *F* und *B* nach *Es* und *As*. Sie unterscheiden sich aber in der Tonhöhe, wie die verschiedenen Tonzeichen *A* und *A* usw. schon anzeigen. In

der temperierten Stimmung erscheint es erlaubt, von *c* durch einen Sextenschritt nach der Tonart von *a* zu gehen, dann durch Quinten zurück, nach *d*, *g*, endlich *c*. Aber in Wahrheit kommt man hierbei auf ein anderes *c*, als von dem man ausgegangen ist. Bei einem solchen Übergang, der jedenfalls nicht ganz natürlich ist, würde man in reiner Stimmung eine enharmonische Vertauschung vornehmen müssen, am besten, während man in der Tonart von *d* verweilt, da sowohl *d* wie $\underline{d}$ mit *c* im zweiten Grade verwandt sind. Bei den verwickelteren Modulationen neuerer Komponisten würden solche enharmonische Verwechselungen natürlich oft zu machen sein. Wo sie anzubringen sind, wird eben ein gebildeter Geschmack in den einzelnen Fällen entscheiden müssen, doch glaube ich, wird es im ganzen ratsam sein, die schon erwähnte Regel festzuhalten und die Stimmung der modulatorisch eintretenden neuen Toniken so zu wählen, daß sie möglichst enge Verwandtschaft mit der Haupttonika behalten. Die enharmonischen Verwechselungen werden am wenigsten bemerkt, wenn sie vor oder nach scharf dissonierenden Akkorden, z. B. verminderten Septimenakkorden, ausgeführt werden. Solche enharmonische Verrückungen der Tonhöhe werden übrigens jetzt schon von den Violinisten zuweilen deutlich und absichtlich ausgeführt, und wo sie hinpassen, machen sie sogar eine sehr gute Wirkung [1]).

Will man eine Skala in fast genauer natürlicher Stimmung herstellen, welche unbegrenzt fortzumodulieren gestattet, ohne daß man zu enharmonischen Vertauschungen gezwungen ist, so läßt sich dies durch die schon von Mercator vorgeschlagene Teilung der Oktave in 53 gleich große Intervalle erreichen. Eine solche Stimmung hat neuerdings Herr Bosanquet [2]) für ein Harmonium mit symmetrisch angeordneter Tastatur benutzt. Wenn man die Oktave in 53 gleich große Intervalle (Stufen) teilt, so geben 31 dieser Stufen eine fast reine etwas zu kleine Quinte, deren Abweichung von der reinen Quinte aber nur $\frac{1}{28}$ von der Abweichung der Quinte der gewöhnlichen

[1]) Beispiele bei C. E. Naumann, Bestimmungen der Tonverhältnisse. Leipzig 1858. S. 48ff.

[2]) An elementary Treatise on Musical Intervals and Temperament by R. H. M. Bosanquet, London. Macmillan 1875. Das betreffende Harmonium war in der Loan Exhibition in Kensington ausgestellt.

gleichschwebenden Temperatur ausmacht [1]), und 17 dieser Stufen geben eine große Terz, die um $\frac{5}{7}$ der letztgenannten Abweichung zu klein ist. Die Abweichung der Quinte dieses Systemes kann man als ganz unwahrnehmbar betrachten, die der Terz ist noch schwerer wahrnehmbar, als die Abweichung der gewöhnlichen temperierten Quinte. Die Durskala wird in diesen Stufen:

	C	— D	— $\underline{E}$	— F	— G	— $\underline{A}$	— $\underline{H}$	— c
	0	9	17	22	31	39	48	53
Differenz:		9	8	5	9	8	9	5

Die untenstehenden Differenzen von 9, 8 und 5 Stufen entsprechen dem großen, kleinen und halben Ton der natürlichen Skala. Jede einzelne Tonstufe der Skala entspricht dem Intervall $\frac{77}{76}$ und ist also um ein Minimum größer als das Kommwela $\frac{81}{80}$, welches in der natürlichen Skala den Unterschied zwischen einem großen und kleinen Halbton bildet. Für das Ohr wird diese Skala von der natürlichen nicht zu unterscheiden sein, und in ihrer praktischen Ausführung gestattet sie unbegrenzte Modulation in so gut wie reiner Stimmung. Der Unterschied zwischen unserem $\underline{c}$ und c, wie zwischen dem c und $\overline{c}$ würde der Erhöhung um je eine Tonstufe entsprechen. Herr Bosanquet wendet dafür die im Druck bequemeren Zeichen $\backslash c$ für $\underline{c}$ und $/c$ für $\overline{c}$ an, $\diagdown c$ für $\underline{\underline{c}}$ usw. Er benutzt diese Zeichen $\backslash$ und $/$ auch in der Notenschrift als Vorzeichen, gerade wie bisher die $\sharp$ und $\flat$ schon gebraucht wurden. Die Tastatur ist nach einem sinnreichen, zuerst von dem Amerikaner Herrn H. W. Poole ersonnenen Plan in sehr übersichtlicher und symmetrischer Weise so geordnet, daß alle Tonleitern und alle gleichartigen Akkorde in allen Tonarten mit demselben Fingersatz gespielt werden können. Das Schema der Tastatur ist in der Beilage XIX skizziert.

Vielleicht kann noch eine Rechtfertigung dafür verlangt werden, daß wir in dieser ganzen Lehre von den Tonarten und Modulationen die Tonart der Oktave nicht von der ihres Grundtones unterschieden

[1]) Wenn man das Verhältnis der Breite des Quintenintervalles zu dem der Oktave (d. h. $\log 1{,}5 : \log 2$) in einem Kettenbruch entwickelt, so bekommt man folgende Näherungswerte: Es sind annähernd

	12	53	306 Quinten
gleich	7	31	179 Oktaven.

Ebenso sind annähernd

	3	28	59 Terzen
gleich	1	9	19 Oktaven.

haben, während wir doch die Tonart der Duodezime unterscheiden. In der gewöhnlichen musikalischen Schullehre wird die Oktave in ihrer Klangbedeutung durchaus als äquivalent ihrem Grundton behandelt. Für uns ist sie der dem Grundton am nächsten und deutlichsten verwandte Ton, aber der Art nach ist diese Verwandtschaft nicht unterschieden von der der Duodezime zum Grundton, oder der nächst höheren großen Terz.

Daß nun in dem besonderen Verhältnis der Skalenbildung, d. h. der Bestimmung der Tonart, die höhere Oktave dieselben Reihen direkt verwandter Töne, wenn auch in etwas verschiedener Ordnung der Stärke der Verwandtschaft herbeizieht, wie die tiefere, ist auf S. 448 und 449 gezeigt worden. Es werden nur bei der Bildung von der unteren Oktave aus die Töne der Durtonleiter, bei der Bildung von der oberen die der Molltonleiter bevorzugt, ohne daß die der anderen Tonleiter ausgeschlossen sind.

Gehen wir über die Grenzen der ersten Oktave hinaus, so ergeben die auf die ersten sechs Partialtöne gestützten Klangverwandtschaften nur noch das Intervall der Dezime und Duodezime. Die anderen Stufen der Leiter sind dann mit Verwandten zweiten Grades zu füllen, und unter diesen werden die Verwandten der Oktave den Vorrang haben müssen, demnächst die der Duodezime. So entsteht notwendig für die zweite Oktave eine Wiederholung der Skala der ersten. Dadurch wird in der Tat in der Bildung der Skalen eine Äquivalenz der Oktaven begründet, ohne daß wir eine spezifisch andere Beziehung der Ähnlichkeit zwischen ihnen und dem Grundton anzunehmen brauchten als für die anderen Konsonanzen. Auch bei der Bildung der konsonanten Intervalle betrachtet die gewöhnliche Musiktheorie die Oktaven als äquivalent. Das ist bis zu gewissen Grenzen richtig, insofern die gewöhnlich als konsonant betrachteten Intervalle durch Verlegung ihrer Töne um Oktaven wieder konsonante oder mindestens an der Grenze der Konsonanzen stehende Intervalle geben. Hier gab die Schule aber in der Tat mit dieser Regel einen sehr unvollkommenen Ausdruck der Tatsachen, da, wie unser X., XI. und XII. Abschnitt zeigen, in der Tat Grad und Reihenfolge der Konsonanzen sich bei solchen Umänderungen erheblich ändern, und die über die Schulregeln hinausgewachsenen Komponisten dies auch sehr deutlich berücksichtigen.

Siebzehnter Abschnitt.

Von den dissonanten Akkorden.

Wenn in mehrstimmigen Sätzen mehrere Stimmen nebeneinander und zugleich melodisch sich bewegen sollen, so wird im allgemeinen die Regel festgehalten werden müssen, daß dieselben Konsonanzen miteinander bilden müssen. Denn nur wenn sie konsonant sind, findet eine ungestörte Mischung der ihnen entsprechenden Gehörempfindungen statt; sobald sie dissonant werden, stören sich die einzelnen Klänge gegenseitig und hemmen jeder den ungestörten Abfluß des anderen. Zu diesem mehr ästhetischen Motiv kommt noch das andere rein sinnliche, daß die konsonanten Zusammenklänge eine angenehme Art sanfter und gleichmäßiger Erregung der Gehörnerven geben, welche durch größere Mannigfaltigkeit sich von der eines einzelnen Klanges auszeichnet, während die Dissonanzen durch ihre Intermittenzen eine den Gehörnerven quälende und erschöpfende Art der Erregung zu Wege bringen.

Indessen die Regel, daß die verschiedenen Stimmen eines mehrstimmigen Satzes miteinander Konsonanzen zu bilden haben, ist nicht ohne Ausnahme. Das ästhetische Motiv für diese Regel kann nicht dagegen sprechen, daß unter gewissen Bedingungen und für kurze Zeit die verschiedenen Stimmen dissonierend werden, wenn nur übrigens durch die Art der Stimmführung dafür gesorgt ist, daß die Führung der nebeneinander hergehenden Stimmen durchaus klar bleibe. Es kommen also dann zu dem allgemeinen Gesetz der Tonleiter und Tonart, dem die Führung jeder Stimme unterworfen ist, noch besondere Gesetze für die Führung der Stimmen in dissonanten Akkorden. Ferner kann auch das sinnliche Motiv der größeren Annehmlichkeit der Konsonanzen die Dissonanzen nicht ganz ausschließen. Denn

wenn auch das sinnlich Angenehme ein wichtiges Unterstützungsmittel der ästhetischen Schönheit ist, so ist es damit doch nicht identisch. Im Gegenteil brauchen wir in allen Künsten vielfach seinen Gegensatz, das sinnlich Unangenehme, teils um durch den Kontrast die Lieblichkeit des ersteren heller hervorzuheben, teils um einen kräftigeren leidenschaftlichen Ausdruck zu erreichen. In demselben Sinn werden die Dissonanzen in der Musik gebraucht. Teils sind sie Mittel des Kontrastes, um den Eindruck der Konsonanzen hervorzuheben, teils Mittel des Ausdruckes, und zwar nicht bloß für besondere und einzelne Gemütsbewegungen, sondern sie dienen ganz allgemein dazu, den Eindruck des Forttreibens und Vorwärtsdrängens in der musikalischen Bewegung zu verstärken, indem das von Dissonanzen gequälte Ohr sich nach dem ruhigen Dahinfließen des Stromes der Töne in reinen Konsonanzen zurücksehnt. In diesem letzteren Sinn finden sie namentlich unmittelbar vor dem Schluß eine hervortretende Art der Anwendung, und hier sind sie auch von den alten Meistern der polyphonen Musik des Mittelalters schon regelmäßig gebraucht worden. Aber auch dieser Zweck ihres Gebrauches fordert, daß die Stimmbewegung so eingeleitet sei, daß der Hörer von vornherein bemerke, wie die Stimmen einem konsonanten Schluß zudrängen, der zwar verzögert oder auch vereitelt werden kann, dessen Vorgefühl aber doch das einzige rechtfertigende Motiv für die Existenz der Dissonanzen ist.

Die Zahl der möglichen dissonanten Akkorde wäre unendlich groß, weil alle möglichen irrationalen Tonverhältnisse dissonant sind, und nur die Zahl der Konsonanzen beschränkt ist, wenn nicht die einzelnen Stimmen, welche einen dissonanten Akkord zusammensetzen, aus den angeführten Rücksichten dem Gesetz der melodischen Bewegung folgen, d. h. sich innerhalb der Tonleiter bewegen müßten. Konsonanzen haben ein selbständiges Recht zu existieren, nach ihnen haben sich unsere modernen Tonleitern gebildet. Dissonanzen aber sind nur als Durchgangspunkte für Konsonanzen erlaubt. Sie haben kein selbständiges Recht der Existenz, und die Stimmen in ihnen bleiben deshalb demselben Gesetz des Fortschrittes in den Stufen der Tonleiter unterworfen, welches zugunsten der Konsonanzen festgestellt ist.

Indem wir zur Aufzählung der einzelnen dissonanten Intervalle übergehen, bemerke ich, daß man in der theoretischen Musik gewöhn-

lich diejenige Lage der dissonanten Akkorde als die normale betrachtet, in welcher ihre einzelnen Töne eine Reihe von Terzen miteinander bilden. Namentlich ist dies die Regel bei den Septimenakkorden, welche aus dem Grundton, dessen Terz, dessen Quinte und dessen Septime bestehen. Die Quinte bildet mit der Terz, die Septime mit der Quinte wiederum ein Terzintervall. So können wir uns die Quinten aus zwei Terzen, die Septimen aus drei Terzen zusammengesetzt denken. Durch Umkehrung der Terzen erhalten wir die Sexten, durch Umkehrung der Quinten die Quarten, durch Umkehrung der Septimen die Sekunden. Wir finden also auf diesem Wege alle in der Tonleiter vorkommenden Intervalle.

Wenn wir die von uns modifizierte Hauptmannsche Bezeichnungsweise der Töne anwenden, ergibt sich auch leicht, wie die verschiedenen Intervalle gleichen Namens sich in der Größe unterscheiden. Wir müssen nur beachten, daß $\overline{c}$ um ein Komma höher ist als c, $\underline{c}$ um zwei Kommata tiefer als $\overline{c}$, um eines tiefer als c. Ein Komma aber ist etwa der fünfte Teil eines halben Tones.

Um gleichzeitig eine anschauliche Übersicht zu geben, teils über die Größe, teils über die Rauhigkeit der einzelnen dissonanten Intervalle, habe ich die Fig. 61 konstruiert, in welcher die Kurve der Rauhigkeit aus Fig. 60a (S. 318) kopiert ist. Die Grundlinie XY bedeutet das Intervall einer Oktave, in welches die einzelnen konsonanten und dissonanten Intervalle nach ihrer Breite in der Skala eingetragen sind. Auf der unteren Seite der Grundlinie sind die zwölf gleichen Halbtöne der temperierten Skala abgeteilt, auf der oberen die konsonanten und dissonanten Intervalle, welche in den natürlichen Tonleitern vorkommen. Die Breite dieser Intervalle ist immer von dem Punkt X bis zu der betreffenden senkrechten Linie hin zu nehmen. Die Lote, welche den Konsonanzen entsprechen, sind bis zum oberen Rand der Zeichnung verlängert, die der Dissonanzen dagegen kürzer gehalten. Die Höhe dieser Lote bis zu dem Punkt hin, wo sie die Rauhigkeitskurve schneiden, entspricht der Rauhigkeit, welche der betreffende Zusammenklang, in der Klangfarbe der Violinen ausgeführt, etwa erzeugen würde.

Die verschiedenen Terzen, Quinten und Septimen der Tonart finden wir, wenn wir die Töne der Leiter nach Terzen ordnen.

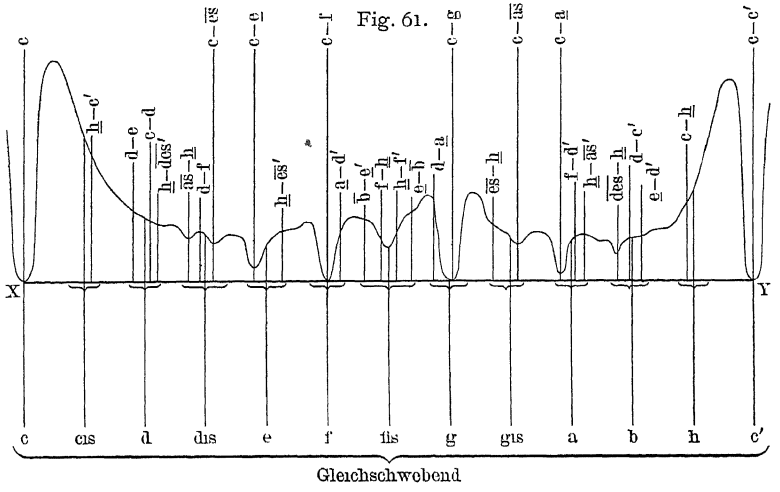


Fig. 61.

A. Töne der Durleiter:

$$\underline{h} - a \mid f - \underline{a} - c - \underline{e} - g - \underline{h} - d \mid f - \underline{a}$$
$$\frac{6}{5}\ \frac{32}{27}\ \frac{5}{4}\ \frac{6}{5}\ \frac{5}{4}\ \frac{6}{5}\ \frac{5}{4}\ \frac{6}{5}\ \frac{32}{27}\ \frac{5}{4}$$

B. Töne der Molltonleiter:

$$\underline{h} - d \mid f - \overline{as} - c - \overline{es} - g - \underline{h} - d \mid f - as$$
$$\frac{6}{5}\ \frac{32}{27}\ \frac{6}{5}\ \frac{5}{4}\ \frac{6}{5}\ \frac{5}{4}\ \frac{5}{4}\ \frac{6}{5}\ \frac{32}{27}\ \frac{6}{5}$$

Für die Molltonleiter ist die gewöhnliche Form mit großer Septime genommen worden, weil die Leiter mit kleiner Septime keine anderen Intervalle gibt als die Durtonleiter.

I. Terzen und Sexten.

In der natürlichen Dur- und Molltonleiter kommen, wie man in der obigen Aufstellung sieht, dreierlei Arten von Terzen vor, welche umgekehrt ebensoviel Arten von Sexten geben, nämlich:

1. Die natürliche große Terz $\frac{5}{4}$ und ihre Umkehrung, die kleine Sexte $\frac{8}{5}$, beide konsonant.

2. Die natürliche kleine Terz $\frac{6}{5}$ und ihre Umkehrung, die große Sexte $\frac{5}{3}$, ebenfalls beide konsonant.

3. Die pythagoreische kleine Terz $\frac{32}{27}$ zwischen den Grenztönen der Tonart *d* und *f*. Führte man die Stimmung $\underline{d}$ statt *d* ein, so würde dasselbe Intervall sich zwischen $\underline{h}$ und $\underline{d}$ zeigen. Vergleicht

man diese dissonante Terz $d — f$ mit der konsonanten kleinen Terz $\underline{d} — f$ der Größe nach, so ist erstere um ein Komma enger als letztere, da d um ein Komma höher als $\underline{d}$ ist. Die pythagoreische kleine Terz steht der natürlichen kleinen Terz an Wohlklang etwas nach, aber ihr Unterschied in dieser Beziehung ist nicht so groß, wie der der entsprechenden beiden großen Terzen. Der Unterschied beruht einmal darin, daß die große Terz eine vollkommenere Konsonanz ist als die kleine Terz, und jener Verstimmung daher mehr schadet, als dieser. Dann findet sich aber auch in den Kombinationstönen ein Unterschied. Die reine kleine Terz $\underline{d'''} — f'''$ bildet den Kombinationston b, ergänzt sich also zum reinen B-Dur-Dreiklang. Die pythagoreische Terz $d''' — f'''$ gibt den Kombinationston $\underline{a}$, ergänzt sich also zu dem Akkord $d — f — \underline{a}$, der kein ganz richtiger Mollakkord ist. Da aber die unrichtige Quinte $\underline{a}$ nur schwach in den tiefen Kombinationstönen liegt, merkt man den Unterschied kaum. Außerdem ist es auch praktisch fast unmöglich, das Intervall so genau zu stimmen, daß der Kombinationston $\underline{a}$ und nicht a wird. Bei der pythagoreischen großen Terz $c'' — e''$ ist aber der Kombinationston *cis*, was natürlich viel störender ist, als die nicht ganz reine Quinte $\underline{a}$ bei dem Zusammenklang $d — f$.

Die pythagoreische große Terz kommt in den von der harmonischen Musik geforderten Stimmungen der Tonleitern nicht vor. Wenn man in der Molltonleiter die kleine Septime b statt $\bar{b}$ benutzen wollte, würde $b — d$ eine solche Terz sein.

Die Umkehrung der Terz $d — f$ ist die pythagoreische große Sexte $f — d$, $\frac{27}{16}$, um ein Komma größer als die natürliche große Sexte, der sie an Wohlklang sehr bedeutend nachsteht, wie Fig. 61 deutlich zeigt.

II. Quinten und Quarten.

Die Quinten setzen sich einfach aus je zwei Terzen zusammen; je nach der Art der Terzen, welche wir zusammensetzen, erhalten wir die verschiedenen Arten der Quinten.

4. Die reine Quinte $\frac{3}{2}$, bestehend aus einer natürlichen großen und einer ebensolchen kleinen Terz. Ihre Umkehrung ist die reine Quarte $\frac{4}{3}$, beide sind konsonant. Beispiele in der Durtonleiter: $f — c$, $\underline{a} — \underline{e}$, $c — g$, $\underline{e} — \underline{h}$, $g — d$.

5. Die unreine Quinte $d — \underline{a}$, $\frac{40}{27}$, um ein Komma kleiner als die reine Quinte $d — a$, besteht aus der großen und der pythagoreischen kleinen Terz. Sie klingt wie eine schlecht gestimmte Quinte und macht deutlich zu unterscheidende Schläge. In der eingestrichenen Oktave ist die Zahl dieser Schläge 11 in der Sekunde. Ihre Umkehrung ist die unreine Quarte $\underline{a} — d$, $\frac{27}{20}$, welche ebenfalls entschieden dissonant ist. Die Quarte $\underline{a} — d$ macht ebensoviel Schläge wie die Quinte $d — \underline{a'}$, wenn in beiden der Ton d der gleiche ist.

6. Die falsche Quinte $\underline{h} — f$, $\frac{64}{45}$, besteht aus einer natürlichen und einer pythagoreischen kleinen Terz $\underline{h} — d$ und $d — f$, und ist deshalb, wie die Notenschrift schon andeutet, um etwa einen halben Ton kleiner als die reine Quinte. Sie ist eine ziemlich rauhe Dissonanz, an Rauhigkeit etwa der großen Sekunde gleichstehend. Ihre Umkehrung, die falsche Quarte oder der Tritonus, $f — \underline{h}$ (drei Ganztöne umfassend $f — g$, $g — \underline{a}$, $\underline{a} — \underline{h}$), $\frac{45}{32}$, ist ihr an Rauhigkeit nahe gleich und etwa um ein Komma kleiner. Nämlich nahehin ist die falsche Quinte $\underline{h} — f$ gleich $ces — f$, und wenn man dieses Intervall um ein Komma kleiner macht, erhält man $ces — \bar{f}$, welches eine falsche Quarte ist. Genau genommen, da *ces* nicht vollkommen gleich ist mit $\underline{h}$, ist der Unterschied zwischen beiden Intervallen etwas kleiner als ein Komma, $\frac{81}{80}$, nämlich $\frac{2048}{2025}$ oder abgekürzt $\frac{89}{88}$. Auf den Tasteninstrumenten fallen beide zusammen.

7. Die übermäßige Quinte der Molltonart $\overline{es} — \underline{h}$, $\frac{25}{16}$, besteht aus zwei großen Terzen $\overline{es} — g$ und $g — \underline{h}$. Sie ist nahehin um zwei Kommata kleiner als die kleine Sexte, wie man sieht, wenn man statt $\underline{h}$ das nahehin gleich hohe *ces* setzt. Es ist $\overline{es} — \underline{h}$ also gleich $\overline{es} — ces$, die konsonante kleine Sexte ist aber $\underline{es} — ces$ und $\overline{es}$ ist um zwei Kommata höher als $\underline{es}$. Die übermäßige Quinte ist merklich rauher als die natürliche kleine Sexte, mit der sie auf den Tasteninstrumenten zusammenfällt. Das umgekehrte Intervall, die verminderte Quarte $\underline{h} — \overline{es}$, $\frac{32}{25}$, ist dementsprechend um zwei Kommata höher als die natürliche große Terz und beträchtlich rauher als diese, fällt aber auf den Tasteninstrumenten mit ihr zusammen.

Zwei natürliche kleine Terzen oder zwei pythagoreische kommen in der natürlichen Terzenfolge der Dur- und Molltonleiter nicht nebeneinander zu stehen. Im Septimen- und Quartengeschlecht können allerdings die Intervalle $\underline{a} — \overline{es}$ und $\underline{e} — \bar{b}$, $\frac{36}{25}$, sich bilden, aus je

zwei natürlichen kleinen Terzen zusammengesetzt; diese sind um ein Komma größer als die gewöhnlichen falschen Quinten $\underline{h} - f'$ (oder $\underline{a} - es$ in b-Dur, $\underline{e} - b$ in f-Dur) und sind merklich rauher als diese.

III. Septimen und Sekunden.

Je drei Terzen zusammengefaßt geben Septimen; von den kleinsten anfangend, erhalten wir folgende verschiedene Größen derselben:

8. Die verminderte Septime der Molltonart $\underline{h} - \overline{as'} = (\underline{h} - d') + (d' - f') + (f' - \overline{as'})$, zwei natürliche und eine pythagoreische kleine Terz umfassend. Ihr Zahlenverhältnis ist $\frac{128}{75}$, sie ist um etwa zwei Kommata größer als die große Sexte, wie man sieht, wenn man setzt $\underline{h} - \overline{as} = ces - \overline{as}$. Das Intervall $ces - \underline{as}$, welches um zwei Kommata enger ist, würde eine reine große Sexte sein. Ihre Dissonanz ist ziemlich scharf und rauh, ähnlich der der pythagoreischen großen Sexte, welche um ein Komma kleiner ist. Ihre Umkehrung dagegen, die übermäßige Sekunde $\overline{as} - \underline{h}$, ist nicht viel rauher als die natürliche kleine Terz. Ihr Zahlenverhältnis $\frac{75}{64}$ ist sehr nahe dem Verhältnis $\frac{7}{6}$ gleich $(\frac{75}{64} = \frac{7}{6} \cdot \frac{225}{224})$. Erweitert man diese Sekunde zur None $\frac{7}{3}$, so wird sie ziemlich wohlklingend, ungefähr so wie die allerdings recht unvollkommene Konsonanz der kleinen Dezime $\frac{12}{5}$.

9. Die engere kleine Septime $g - f'$, $\underline{h} - \underline{a'}$ oder $d - c$, $\frac{16}{9}$, besteht aus einer großen, einer natürlichen und einer pythagoreischen kleinen Terz, $g - f' = (g - \underline{h}) + (\underline{h} - d') + (d' - f')$. Sie ist eine verhältnismäßig milde Dissonanz, milder als die verminderte Septime, was für die Wirkung des Dominantseptimenakkordes, in welchem diese Septime vorkommt, von Wichtigkeit ist. Es ist diese engere kleine Septime von allen Septimenintervallen der natürlichen Septime $\frac{7}{4}$ am nächsten, doch nicht so nahe, wie das später zu erwähnende Intervall der übermäßigen Sexte. Daß sich die natürliche Septime im Wohlklang den Konsonanten anschließt, habe ich schon früher erörtert. Die Umkehrung dieser Septime ist der große Ganzton $c - d$, $\underline{a} - \underline{h}$, $f - g$, $\frac{9}{8}$, der eine kräftige Dissonanz bildet.

10. Die weitere kleine Septime $\underline{e} - d'$, $\underline{a} - g'$, $\frac{9}{5}$, um ein Komma größer als die vorige, klingt merklich schärfer, weil sie sich der Oktave mehr nähert; sie ist der verminderten Septime an Rauhigkeit fast gleich. Sie besteht aus einer großen und zwei natürlichen

kleinen Terzen; $\underline{e} - d' = (\underline{e} - g) + (g - \underline{h}) + (\underline{h} - d')$. Die vorher genannte engere kleine Septime muß ihren Grundton auf der Oberdominantseite, ihre Septime auf der Unterdominantseite der Tonart haben, weil sie die pythagoreische Terz $d - f$ in ihre Grenzen einfaßt. Die weitere kleine Septime hat umgekehrt ihre Septime auf der Oberdominantseite. Ihre Umkehrung, der kleine Ganzton, $\frac{10}{9}$, $d - \underline{e}$, $g - \underline{a}$, ist etwas schärfer im Zusammenklang, als der große Ganzton.

11. Die große Septime $f - \underline{e'}$, $c - \underline{h}$, $\frac{15}{8}$, besteht aus zwei großen und einer natürlichen kleinen Terz $c - \underline{h} = (c - \underline{e}) + (\underline{e} - g) + (g - \underline{h})$. Sie ist eine scharfe Dissonanz, etwa ebenso scharf, wie der kleinere Ganzton. Ihre Umkehrung, die kleine Sekunde oder der Halbton $\frac{16}{15}$, ist von allen Dissonanzen der Tonleiter die schärfste.

Eine etwas abweichende große Septime könnte im Quarten- oder Septimengeschlecht entstehen, $\underline{b} - \underline{a'}$, welche um ein Komma kleiner wäre als die gewöhnliche große Septime, und deshalb im Klang etwas milder.

Zu erwähnen ist endlich noch ein eigentümliches Intervall des dorischen Sextengeschlechtes, nämlich

12. die übermäßige Sexte $\overline{des} - \underline{h}$, welche durch Verbindung der diesem Geschlecht eigentümlichen kleinen Sekunde $\overline{des}$ mit dem Leitton $\underline{h}$ entsteht. Der Wert des Intervalles ist $\frac{225}{128}$; es ist um etwa ein Komma kleiner als die kleine Septime des Dominantseptimenakkordes, wie man sieht, wenn man setzt $\overline{des} - \underline{h} = \overline{des} - ces'$; eine engere kleine Septime würde $des - ces'$ sein; $\overline{des}$ ist aber ein Komma höher als des. Man kann sich die übermäßige Sexte zusammengesetzt denken aus zwei großen Terzen und einem ganzen Ton:

$$(\overline{des} - f) + (f - g) + (g - \underline{h}).$$

Ihr Wohlklang ist dem der kleinen Sexte gleich, weil sie nämlich fast genau dem natürlichen Intervall $\frac{7}{4}$ entspricht. Es ist nämlich $\frac{225}{128} = \frac{7}{4} \cdot \frac{225}{224}$. Sie kann also allein genommen nicht als Dissonanz betrachtet werden, aber sie läßt keine anderen konsonanten Verbindungen zu und kann also nicht konsonante Akkorde bilden. Wenn sie umgekehrt wird, in die verminderte Terz $\frac{256}{225}$ oder annähernd $\frac{8}{7}$, so verschlechtert sie sich bedeutend, wie schon früher bemerkt wurde; dagegen verbessert sie sich, wenn der höhere Ton $\underline{h}$ eine Oktave höher gelegt wird, wo sie nahehin das Intervall $\frac{7}{2}$ dar-

stellt. Die nahe Übereinstimmung mit der natürlichen Septime und der verhältnismäßige Wohlklang scheint es zu sein, der dieses sonderbare und unserem jetzigen Tonsystem widersprechende Intervall in den Kadenzen erhalten hat, und charakteristisch ist es hierfür, daß seine Umkehrung in die verminderte Terz, welche den Wohlklang vermindert, verboten, wohl aber die Erweiterung in die entsprechende Terzdezime erlaubt ist. Auf den Tastaturinstrumenten fällt dieses Intervall mit der kleinen Septime zusammen.

Überhaupt wird ein Blick auf die Fig. 61 lehren, wie außerordentlich verschiedene Intervalle auf den Tastaturinstrumenten verschmolzen werden. Auf der unteren Seite der Grundlinie $X — Y$ sind die Orte der Töne der gleichschwebenden Temperatur angegeben, und die kleinen Klammern längs der Linie XY umfassen diejenigen Tonstufen, welche durch den entsprechenden Ton der temperierten Skala ausgedrückt zu werden pflegen. Das Intervall $\underline{h} — \overline{as}$ wird auf dem Klavier ebenso gegriffen wie eine große Sexte $ces — as$, das Intervall $\overline{des} — \underline{h}$ dagegen wird um einen halben Ton weiter gegriffen, und doch ist das letztere vom ersten kaum mehr unterschieden, als das erste von der großen Sexte. Und namentlich zeigt die Figur auch sehr gut, welcher große Unterschied in dem Wohlklang zwischen dem Intervall $c — \underline{a}$ und dem $f — d'$ oder $\underline{h} — \overline{as}'$ bestehen sollte, während diese alle durch den ziemlich scharfen Klang des temperierten Intervalles $c — a$ ausgedrückt werden. Das Harmonium mit doppelter Tonreihe erlaubt dagegen, alle diese Intervalle rein zu greifen, wobei die Unterschiede ihres Klanges äußerst auffallend sind. Hierin liegt offenbar eine der größten Unvollkommenheiten der temperierten Stimmung.

Dissonante Dreiklänge.

Dissonante Dreiklänge mit je einer Dissonanz erhalten wir, wenn wir zu demselben Grundton je zwei Konsonanzen hinzusetzen, die miteinander aber dissonant sind. Also

1. Quinte und Quarte: $c — f — g$.
2. Terz und Quarte: $c — \underline{e} — f$ oder $c — \overline{es} — f$.
3. Quinte und Sexte: $c — g — \underline{a}$ oder $c — g — \overline{as}$.
4. Ungleichartige Terz und Sexte: $c — \overline{es} — \underline{a}$ oder $c — \underline{e} — \overline{as}$.

In allen diesen ist c zu beiden anderen Tönen konsonant. Nur der erstgenannte Akkord spielt namentlich in der älteren polyphonen Musik als sogenannter Vorhaltsakkord eine wichtige Rolle. Die übrigen werden wir später als Teile von Septimenakkorden wiederfinden.

Die unter 4. genannten Akkorde können eine Umlagerung erfahren, wobei sie als Dreiklänge mit verminderten oder übermäßigen Quinten erscheinen, nämlich:

$$\underline{a} - c - \overline{es} \quad \text{und} \quad \overline{as} - c - \underline{e}.$$

Der erste derselben ist aus zwei reinen kleinen Terzen zusammengesetzt, der zweite aus zwei reinen großen Terzen; beide sind wegen der veränderten Quinte dissonant, obgleich die Dissonanz des zweiten auf den Tastaturinstrumenten wie die Konsonanz $\underline{gis} - e$ gegriffen wird. Der erste beider Akkorde kann nur im Terzengeschlecht vorkommen, der obige würde in das von F gehören; der zweite dagegen gehört zu F-Moll.

Denken wir uns die Reihe dieser Töne fortgesetzt:

$$\overline{as} - c' - \underline{e'} - \overline{as} - c'' - \underline{e''},$$
$$\frac{5}{4} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{32}{25} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{5}{4}$$

so schiebt sich zwischen zwei Paare reiner Terzen das Intervall

$$\frac{32}{25} = \frac{5}{4} \cdot \frac{128}{125} \text{ annähernd } = \frac{5}{4} \cdot \frac{43}{42}$$

ein, welches ein wenig (nahehin zwei Kommata) größer ist als eine reine große Terz. Durch kleine Änderungen der Tonhöhe bilden sich andere Akkorde, die anderen Tonarten angehören:

$$\overline{As} - c - \underline{e} - \overline{as} \text{ in } F\text{-Moll}$$
$$\frac{5}{4} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{32}{25}$$
$$\underline{\underline{Gis}} - c - \underline{e} - \underline{\underline{gis}} \text{ in } \underline{A}\text{-Moll}$$
$$\frac{32}{25} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{5}{4}$$
$$\overline{As} - c - \overline{\overline{fes}} - \overline{as} \text{ in } \overline{Des}\text{-Moll.}$$
$$\frac{5}{4} \quad \frac{32}{25} \quad \frac{5}{4}$$

Die Grundtöne dieser drei Molltonarten

$$\overline{Des} - F - \underline{A}$$

bilden wieder einen ähnlichen Akkord, dessen Töne um einen Halbton höher liegen, als die des früheren. Da $\overline{As}$ annähernd gleich Gis und

Fes annähernd gleich $\underline{E}$ ist, so ist bei diesen Umformungen immer je einer der Akkordtöne um zwei Kommata verschoben worden, oder wird wenigstens in der Auflösung als Leitton so behandelt, als wäre er verschoben. Dadurch erreicht man Modulationen, die mit einem Schritt in verhältnismäßig weit entfernte Tonarten führen, und zwar kann man ebensogut in die Molltonarten, wie in die Durtonarten der genannten drei Grundtöne auflösen. Das Mittel wird von neueren Komponisten (namentlich Richard Wagner) viel benutzt an Stelle der sonst in ähnlicher Weise angewendeten, aber viel rauheren verminderten Septimenakkorde. Bei reiner Stimmung klingen diese Akkorde lange nicht so unangenehm, wie in der temperierten Stimmung des Klaviers. Überhaupt ist zu bemerken, daß, wenn man in reiner Stimmung spielt, das Ohr gegen eine um ein Komma falsch gegebene Tonhöhe in dissonanten Akkorden durchaus nicht weniger empfindlich ist, als in konsonanten.

Wichtiger sind in der neueren Musik die Dreiklänge mit zwei Dissonanzen, welche die Grenztöne der Tonart zusammenfassen.

In dem Akkordsystem der Tonart folgen sich wechselnd große und kleine Terzen, von denen zwei benachbarte zusammengefaßt konsonante Dreiklänge geben. Zwischen den Grenztönen *d* und *f* aber beträgt das Intervall eine pythagoreische kleine Terz, und wenn diese mit einer der nächstanschließenden Terzen zu einem Dreiklang vereinigt wird, wird dieser dissonant:

Dur: $\underbrace{c}_{\frac{5}{4}}-\underbrace{\underline{e}}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{g}_{\frac{5}{4}}-\underbrace{\underline{h}}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{d}_{\frac{32}{27}}\,|\,\underbrace{f}_{\frac{5}{4}}-\underbrace{\underline{a}}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{c}_{\frac{5}{4}}-\underbrace{\underline{e}}_{\frac{6}{5}}-g,$

Moll: $\underbrace{c}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{\overline{es}}_{\frac{5}{4}}-\underbrace{g}_{\frac{5}{4}}-\underbrace{\underline{h}}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{d}_{\frac{32}{27}}\,|\,\underbrace{f}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{\overline{as}}_{\frac{5}{4}}-\underbrace{c}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{\overline{es}}_{\frac{5}{4}}-g.$

Das Dursystem gibt zwei Dreiklänge der Art:

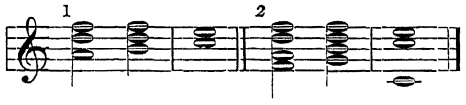
$$\underbrace{\underline{h}}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{d}_{\frac{32}{27}}-f \quad \text{und} \quad \underbrace{d}_{\frac{32}{27}}-\underbrace{f}_{\frac{5}{4}}-\underline{a},$$

das Mollsystem:

$$\underbrace{\underline{h}}_{\frac{6}{5}}-\underbrace{d}_{\frac{32}{27}}-f \quad \text{und} \quad \underbrace{d}_{\frac{32}{27}}-\underbrace{f}_{\frac{6}{5}}-\overline{as}.$$

In den beiden Akkorden $\underline{h}-d-f$ und $d-f-\overline{as}$, welche die pythagoreische mit der kleinen Terz vereinigen, entstehen als zweite

Dissonanzen auch noch die falschen Quinten $\underline{h}—f$ und $d—\overline{as}$, welche die Akkorde stärker dissonant machen, als es die Terz $\frac{32}{27}$ tun würde, man nennt sie die verminderten Dreiklänge. Der Akkord $d—f—\underline{a}$, obgleich er in Notenschrift wie der Mollakkord $\underline{d}—f—\underline{a}$ aussieht, und deshalb auch der falsche Molldreiklang heißen mag, ist, wie Hauptmann mit Recht erörtert hat, dissonant, und er klingt, auf rein gestimmten Instrumenten ausgeführt, auch ganz entschieden so. Er klingt kaum weniger rauh als der Akkord $\underline{h}—d—f$. Macht man in C-Dur, ohne d mit $\underline{d}$ zu verwechseln, die Kadenz 1 oder 2:



so treten die Akkorde $\underline{a}—d'—f'$ und $f—\underline{a}—d'—f'$ ganz ebenso als dissonante Akkorde auf wie die folgenden $\underline{h}—d'—f'$ und $g—\underline{h}—d'—f'$. In der ungenauen Stimmung unserer musikalischen Instrumente erreicht man dieselbe Wirkung nur, indem man mit der Subdominante in der Kadenz einen umgelegten Septimenakkord $f—\underline{a}—c—d$ verbindet. Hauptmann zweifelt, daß der falsche Molldreiklang von C-Dur in der Anwendung von dem D-Mollakkord unterschieden werden könne. Ich finde, daß dies auf meinem rein gestimmten Harmonium ganz entschieden und unzweifelhaft geschieht, gebe aber zu, daß es mißlich sein würde, von Sängern die richtige Intonation zu erwarten. Sie werden unwillkürlich in einen reinen Mollakkord übergehen, wenn nicht in der Führung der Stimme, welche das D übernimmt, die Verwandtschaft mit der Dominante G stark hervorgehoben ist.

Diese Akkorde, und zwar am entschiedensten und deutlichsten der Akkord $\underline{h}—d—f$, haben nun noch für die Musik die besondere Wichtigkeit, daß sie die Grenztöne der Tonart, durch welche diese von den nächstverwandten geschieden ist, zusammenfassen und somit sehr bestimmt die Tonart bezeichnen, in welcher sich die Harmonie zurzeit bewegt. Schritte sie nach G-Dur oder G-Moll fort, so würde statt des f ein $\underline{fis}$ eintreten müssen. Schritte sie nach F-Dur fort, so würde statt d ein $\underline{d}$ oder in F-Moll ein $\overline{des}$ eintreten. Außerdem würde sich in dem $\underline{h}$ enthaltenden Akkord ein b einstellen. Also:

in *G*-Dur:	$\underline{h}$— d — $\underline{fis}$	d — $\underline{fis}$ — a
in *C*-Dur:	$\underline{h}$— d — f	d — f — $\underline{a}$
in *F*-Dur:	$\underline{b}$— $\underline{d}$ — f	$\underline{d}$ — f — $\underline{a}$
in *G*-Moll:	b— d — $\underline{fis}$	d — $\underline{fis}$ — a
in *C*-Moll:	$\underline{h}$— d — f	d — f — $\overline{as}$
in *F*-Moll:	b — $\overline{des}$ — f	$\overline{des}$ — f — $\overline{as}$

Man sieht, daß diese Akkorde in den nächstverwandten Tonarten deutlich unterschieden sind, mit Ausnahme des $d-f-\underline{a}$ und $\underline{d}-f-\underline{a}$, deren Unterscheidung im Gesang zweifelhaft sein würde. Die beiden anderen sind deutlicher von denen der nächstbenachbarten Tonarten unterschieden. Dagegen würden auch

$$\underbrace{\underline{h}-d}_{\frac{6}{5}}\underbrace{-f}_{\frac{32}{27}} \quad \text{und} \quad \underbrace{d-f}_{\frac{32}{27}}\underbrace{-\overline{as}}_{\frac{6}{5}}$$

leicht verwechselt werden mit

$$\underbrace{\underline{h}-\underline{d}}_{\frac{32}{27}}\underbrace{-f}_{\frac{6}{5}} \quad \text{und} \quad \underbrace{\underline{d}-f}_{\frac{6}{5}}\underbrace{-\overline{as}}_{\frac{32}{27}},$$

von denen der erstere zu $\underline{a}$-Moll und der letztere zu $\overline{es}$-Dur oder $\overline{es}$-Moll gehört. $\underline{a}$-Moll ist die dem c-Dur nächstverwandte Molltonart, $\overline{es}$-Dur die dem c-Moll nächstverwandte Durtonart.

Und endlich, wenn man berücksichtigt, daß die kleine pythagoreische Terz $\frac{32}{27}$ noch weniger von der übermäßigen Sekunde $\frac{75}{64}$ geschieden ist, als von der normalen kleinen Terz ($\frac{32}{27} = \frac{6}{5}\cdot\frac{80}{81}$ und $\frac{32}{27} = \frac{75}{64}\cdot\frac{2048}{2025}$ oder nahehin $\frac{32}{27} = \frac{75}{64}\cdot\frac{80}{88}$), so kann der Dreiklang $\underline{h}-d-f$ durch verhältnismäßig kleine Änderungen der Intonation übergehen in

$$\underbrace{\underline{h}-d}_{\frac{6}{5}}\underbrace{-\underline{\underline{eis}}}_{\frac{75}{64}} \quad \text{und} \quad \underbrace{\overline{ces}-\underline{d}}_{\frac{75}{64}}\underbrace{-f}_{\frac{6}{5}},$$

die zu $\underline{fis}$-Moll und es-Moll gehören. Es kann also der verminderte Dreiklang $\underline{h}-d-f$ bei Änderungen seiner Intonation um nur $\frac{81}{80}$ zu den Tonarten

C-Dur, *C*-Moll, $\underline{A}$-Moll, $\underline{Fis}$-Moll und *Es*-Moll

bezogen werden. Wenn durch Gebrauch des Dreiklanges $\underline{h}-d-f$ auch die nächstverwandten Tonarten von C ausgeschlossen sind, so kann doch eine Verwechselung mit entfernteren noch eintreten, und wenn wir den Zweck, durch diese Dreiklänge die Tonart vollständig

zu bezeichnen, erreichen wollen, müssen wir noch einen vierten Ton hinzunehmen, also den Akkord vierstimmig machen, wodurch wir zu den Septimenakkorden gelangen.

Septimenakkorde.

a) Gebildet aus zwei konsonanten Dreiklängen.

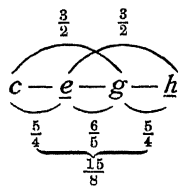
Konsonante vierstimmige Akkorde lassen sich nicht bauen, wie früher gezeigt ist, ohne einen der Töne in der Oktave zu verdoppeln, aber dissonante Akkorde lassen sich vierstimmig bauen. Die am wenigsten dissonante Art dieser Akkorde ist diejenige, wo nur ein einziges Intervall dissonant ist, alle übrigen konsonant. Man bildet sie am einfachsten, wenn man zwei konsonante Dreiklänge vereinigt, die je zwei gemeinsame Töne enthalten. Bei der Vereinigung sind dann die nicht gemeinsamen Töne dissonant, alles übrige ist konsonant, so daß die Dissonanz zwischen der Menge der übrigen konsonanten Töne sich verhältnismäßig wenig bemerkbar macht. Also die Akkorde

$$c — \underline{e} — g$$
$$\underline{e} — g — \underline{h}$$

vereinigt, geben den vierstimmigen Akkord

$$c — \underline{e} — g — \underline{h},$$

in welchem nur die große Septime $c — \underline{h}$ ein dissonantes Intervall ist, alle übrigen konsonant, wie folgende Übersicht der Intervalle zeigt:

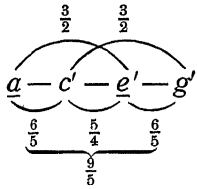


Diese aus der engsten Lage der Dreiklänge abgeleitete Lage des Septimenakkordes wird als die fundamentale Lage desselben betrachtet. Die Intervalle zwischen den einzelnen Tönen erscheinen als Terzen, und wenn wir die Septimenakkorde aus den konsonanten Dreiklängen der Tonleiter bilden, müssen diese Terzen abwechselnd große und kleine sein, weil in den konsonanten Dreiklängen immer

eine große Terz mit einer kleinen vereinigt ist. Hauptmann nennt diese Septimenakkorde, welche in der natürlichen Terzenfolge der Tonart

$$f — \underline{a} — c — \underline{e} — g — \underline{h} — d$$

schon fertig gebildet vorkommen, Akkorde des unverwendeten Systemes. Ein Unterschied in diesen Dreiklängen entsteht daher nur dadurch, daß entweder eine kleine Terz in der Mitte steht und zwei große seitlich, wie in dem eben angeführten Dreiklang $c — \underline{e} — g — \underline{h}$ und dem ähnlichen $f — \underline{a} — c' — \underline{e}'$ aus der C-Durleiter und $\overline{as} — c — \overline{es} — g$ aus C-Moll, oder aber eine große Terz in der Mitte mit zwei kleinen an den Seiten vereinigt ist, wie in



und dem ähnlichen Dreiklang $\underline{e} — g — \underline{h} — d$ aus der C-Durleiter und $f — \overline{as} — c — \overline{es}$ aus C-Moll. Diese letzteren haben als Dissonanz die kleine Septime, welche viel milder ist als die Dissonanz der großen Septime.

b) Septimenakkorde, gebildet mit dissonanten Dreiklängen.

Weitere Septimenakkorde sind zu bilden aus den dissonanten Grenzdreiklängen der Tonart, vereinigt mit je einem der konsonanten Dreiklänge, und aus den beiden dissonanten Dreiklängen selbst. So geben uns die vereinigten Grenzen der Akkordkette der Tonart

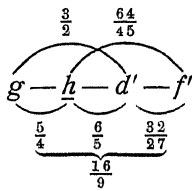
$$c — \underline{e} — g — \underline{h} — d \mid f — \underline{a} — c$$

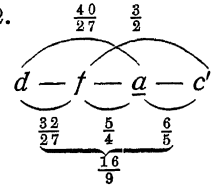
und

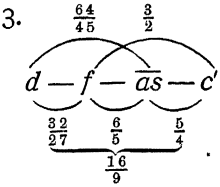
$$c — \overline{es} — g — \underline{h} — d \mid f — \overline{as} — c$$

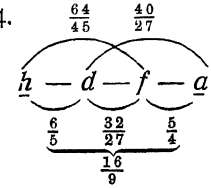
folgende Reihe von Septimenakkorden des verwendeten Systemes:

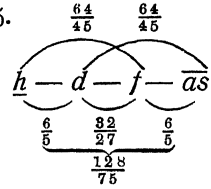
1.



2. 

3. 

4. 

5. 

Die Septimen in diesen Akkorden, welche alle der natürlichen Septime $\frac{7}{4}$ ziemlich nahe kommen, sind sämtlich kleiner als die der aus konsonanten Akkorden zusammengesetzten Septimenakkorde. Die Hauptdissonanzen dieser Akkorde sind die falschen und unreinen Quinten h—f, d—a und d—as, also die Intervalle $\frac{64}{45}$ und $\frac{40}{27}$. Die drei ersten Septimenakkorde $g — h — d — f$, $d — f — a — c$ und $d — f — as — c$, welche nur je eine dieser unreinen Quinten enthalten, sind deshalb milder dissonant als die beiden letzten mit je zwei unreinen Quinten. Unter diesen Akkorden stehen die, welche einen Durakkord enthalten, nämlich

$$\underbrace{g — h — d}\,— f \quad \text{und} \quad d — \underbrace{f — a — c}$$

in der Schärfe der Dissonanz ungefähr gleich den milderen Septimenakkorden des unverwendeten Systemes, welche die größere und rauhere Art der kleinen Septime enthalten, daneben aber lauter reine Quinten:

$$\underbrace{a — c — e}\,— g \quad \text{und} \quad \underbrace{e — g — h}\,— d.$$

Der Dominantseptimenakkord $g—\underline{h}—d'—f'$ kann sogar noch viel milder gemacht werden, wenn man das f zu $\underline{f}$ erniedrigt. Das Intervall $g—\underline{f}'$ entspricht dem Verhältnis $\frac{1280}{729}$, welches sehr nahe gleich ist dem Verhältnis $\frac{7}{1}$. Es ist nämlich angenähert $\frac{1280}{729} = \frac{7}{4} \cdot \frac{301}{300}$. Der Akkord $g—\underline{h}—d—\underline{f}$ steht an der Grenze der konsonanten Akkorde.

Der Septimenakkord dagegen, welcher eine falsche Quinte und einen Mollakkord enthält,

$$d—\underbrace{f—\overline{as}—c}$$

schließt sich in der Rauhigkeit den Akkorden des unverwendeten Systemes mit großer Septime an:

$$f—\underline{a}—c—\underline{e} \quad \text{und} \quad c—\underline{e}—g—\underline{h}.$$

Dabei ist auffallend, daß der genannte Akkord genau dieselben Intervalle, nur in umgekehrter Lage hat wie $g—\underline{h}—d—f$, denn

$$\underbrace{d—f}_{\frac{32}{27}}\underbrace{—\overline{as}}_{\frac{6}{5}}\underbrace{—c'}_{\frac{5}{4}} \qquad \underbrace{g—\underline{h}}_{\frac{5}{4}}\underbrace{—d'}_{\frac{6}{5}}\underbrace{—f'}_{\frac{32}{27}}.$$

Dadurch, daß der konsonante Teil des ersteren Akkordes ein Mollakkord ist, im zweiten dagegen ein Durakkord, fällt der erstere entschieden rauher aus als der letztere.

Auch hier ist der Grund wieder in den Kombinationstönen zu suchen, von denen die tiefliegenden der engeren Intervalle am deutlichsten sind. Diese sind für

$$\underbrace{g'—\underline{h}'}_{G}\underbrace{—d''}_{G}\underbrace{—f''}_{\underline{A}}$$

und für

$$\underbrace{d''—f''}_{\underline{A}}\underbrace{—\overline{as}''}_{\overline{des}}\underbrace{—c''}_{\overline{as}}.$$

Der erstere enthält unter den angegebenen Kombinationstönen nur einen, der zum Akkord nicht paßt, der zweite zwei.

Die rauhesten sind die Septimenakkorde mit je zwei falschen Quinten, $\underline{h}—d—f'—\underline{a}'$ und $\underline{h}—d'—f'—\overline{as}'$, von denen der erstere aber wieder mittels einer kleinen Änderung seiner Stimmung ziemlich weich gemacht werden kann. Wenn man nämlich angibt $\underline{h}—d—\underline{f}'—a'$, so enthält der Akkord lauter Töne des G-Klanges, und diese klingen ziemlich gut zueinander.

Die Akkorde des verwendeten Systemes spielen nun eine wichtige Rolle in modulatorischen Bewegungen, um die Tonart fortdauernd genau zu bezeichnen. Am entschiedensten wirkt in dieser Beziehung der Septimenakkord auf der Dominante der Tonart, also für die Tonika *C* der Akkord $g - h - d - f$. Wir sahen, daß der verminderte Dreiklang $\underline{h} - d - f$ durch kleine Änderungen der Intonation angepaßt werden kann den Tonarten

C-Dur, *C*-Moll, $\underline{A}$-Moll, $\underline{Fis}$-Moll und *Es*-Moll.

Von diesen enthalten aber nur die beiden ersten noch den Ton *G*, so daß der Akkord $g - \underline{h} - d - f$ nur der Tonika *C* angehört.

Der unreine Molldreiklang $d - f - \underline{a}$, welcher bei genauer Intonation nur der *C*-Durleiter angehört, ließ die Verwechselung mit $\underline{d} - f - \underline{a}$ zu, welcher zu $\underline{A}$-Moll, *F*-Dur und *B*-Dur gehören kann. Durch die Hinzufügung des Tones *C* wird diesen Verwechselungen nicht vorgebeugt, so daß der Septimenakkord $d - f - \underline{a} - c$ nur in Abwechselung mit dem Dominantseptimenakkord in der Kadenz gebraucht zu werden pflegt, wo er dann *C*-Dur von *C*-Moll unterscheidet. Wohl aber ist die Hinzufügung des Tones $\underline{h}$ zu dem Dreiklang $d - f - \underline{a}$ charakteristisch, weil dieser höchstens noch die Verwechselung mit dem Akkord $\underline{h} - \underline{d} - f - \underline{a}$, der zu $\underline{A}$-Moll gehört, zuläßt. Der Akkord $\underline{h} - d - f - \underline{a}$, zwischen Durakkorden gebraucht, klingt aber verhältnismäßig rauh, namentlich in jeder Umlagerung, in der *a* nicht der oberste Ton bleibt, und findet deshalb nur eine beschränkte Anwendung. Oft wird er mit dem Dominantseptimenakkord vereinigt, als Nonenakkord $g - \underline{h} - d' - f' - \underline{a}'$, wo aber *g* und *d'* seine äußersten Töne bleiben müssen. Darüber unten mehr.

In der *C*-Molltonart kann der Dreiklang $d - f - \overline{as}$, der in seiner reinen Intonation an sich charakteristisch wäre, auch mit anderen leicht vertauscht werden. Es gehört:

$d - f - \overline{as}$ zu *C*-Moll,
$\frac{32}{27}\ \ \frac{6}{5}$

$\underline{d} - f - as$ zu *Es*-Dur und *Es*-Moll,
$\frac{6}{5}\ \ \frac{32}{27}$

$a - \overline{f} - \underline{gis}$ zu *A*-Moll,
$\frac{6}{5}\ \ \frac{75}{64}$

$\overline{d} - \underline{eis} - gis$ zu *Fis*-Moll.
$\frac{75}{64}\ \ \frac{6}{5}$

Der Zusatz des Tones C im Septimenakkord $d — f — \overline{as} — c$ würde nur die Tonart *Fis*-Moll entschieden ausschließen, und der Zusatz des Tones $\underline{h}$, der mit h oder *ces* zu verwechseln wäre, würde zu allen den oben aufgeführten Tonarten passen. Dieser letztere Akkord, der sogenannte verminderte Septimenakkord, erscheint auf den Tasteninstrumenten als eine Kette kleiner Terzen. In Wahrheit steht aber zwischen je zwei kleinen Terzen eine pythagoreische kleine Terz oder eine übermäßige Sekunde:

$$\underbrace{\underline{h}}_{\frac{6}{5}}\underbrace{d}_{\frac{32}{27}}\underbrace{f}_{\frac{6}{5}}\underbrace{\overline{as}}_{\frac{75}{64}}\underbrace{\underline{h}}_{\frac{6}{5}}\underbrace{d}_{\frac{32}{27}}\underbrace{f}_{\frac{6}{5}}\underbrace{\overline{as}}_{\frac{75}{64}}\underline{h}.$$

Da die drei Intervalle $\frac{6}{5}$, $\frac{32}{27}$ und $\frac{75}{64}$ nur sehr wenig verschieden sind, so können sie leicht miteinander verwechselt werden, und wir erhalten folgende Tonreihen, die nahe gleich sind:

$$\underbrace{\underline{h}}_{\frac{6}{5}}\underbrace{d}_{\frac{32}{27}}\underbrace{f}_{\frac{6}{5}}\underbrace{\overline{as}}_{\frac{75}{64}}\underline{h} \quad \text{in } C\text{-Moll},$$

$$\underbrace{h}_{\frac{32}{27}}\underbrace{d}_{\frac{6}{5}}\underbrace{\overline{f}}_{\frac{75}{64}}\underbrace{gis}_{\frac{6}{5}}h \quad \text{in } A\text{-Moll},$$

$$\underbrace{h}_{\frac{6}{5}}\underbrace{\overline{d}}_{\frac{75}{64}}\underbrace{eis}_{\frac{6}{5}}\underbrace{gis}_{\frac{32}{27}}h \quad \text{in } Fis\text{-Moll},$$

$$\underbrace{\overline{ces}}_{\frac{75}{64}}\underbrace{\underline{d}}_{\frac{6}{5}}\underbrace{f}_{\frac{32}{27}}\underbrace{as}_{\frac{6}{5}}\overline{ces} \quad \text{in } Es\text{-Moll}.$$

Diese verminderten Septimenakkorde stechen in der Molltonart nicht so scharf gegen die konsonanten Akkorde ab, wie der entsprechende Akkord in der Durtonart, obgleich sie bei reiner Stimmung immer eine sehr einschneidende Dissonanz geben. Wenn sie gefolgt werden von dem Dreiklang der Tonika, so enthalten diese beiden Akkorde zusammen sämtliche Töne der Tonart, bezeichnen diese also sehr vollständig. Die Hauptverwendung findet übrigens der verminderte Septimenakkord durch seine Veränderlichkeit, um schnell in eine neue entferntere Tonart überzuleiten. Durch bloße Hinzufügung des Molldreiklanges von *Fis*-, *A*-, *C*- oder *Es*-Moll wird dann diese neue Tonart selbst ganz vollständig festgestellt. Man bemerkt leicht, daß die Reihe dieser Tonarten selbst einen verminderten Septimenakkord bildet, dessen Töne um einen halben Ton höher

liegen als die des angegebenen Akkordes. Dadurch sind die Tonarten, zu denen er gehört, leicht zu merken.

Das Zusammenschließen der Tonart durch diese Akkorde ist besonders wichtig in der Kadenz am Schluß einer Komposition oder einer Hauptperiode derselben. Dazu müssen wir nun noch feststellen, welche Grundklänge durch die hierher gehörigen Septimenakkorde repräsentiert werden können.

In dieser Beziehung ist aber zu bemerken, daß die Töne eines dissonanten Akkordes nie alle, oder dann wenigstens nur unvollkommen, einen einzigen Klang repräsentieren; einige von ihnen kann man aber in der Regel als Bestandteile eines Klanges auffassen. Dadurch entsteht ein praktisch wichtiger Unterschied zwischen den verschiedenen Tönen eines solchen Akkordes. Diejenigen Töne nämlich, welche als Bestandteile eines Klanges zusammengefaßt werden können, bilden miteinander eine in sich geschlossene und zusammengehörige Klangmasse. Ein oder zwei andere Töne des Akkordes dagegen, welche in diese Klangmasse nicht hineingehören, erscheinen als vereinzelte und zufällig nebenher laufende Töne. Diese letzteren werden von den Musikern die Dissonanzen oder die dissonanten Noten des Akkordes genannt. An und für sich ist in einem dissonanten Intervall der eine Ton natürlich ebensogut dissonant gegen den anderen, wie der zweite gegen den ersten, und wenn keine anderen hinzukommen, hat es keinen Sinn, nur einen von ihnen allein für die dissonante Note erklären zu wollen. In der Septime $c — \underline{h}$ z. B. ist c gegen $\underline{h}$ und $\underline{h}$ gegen c dissonant, jedes nur in Beziehung auf das andere. In dem Akkord $c — \underline{e} — g — \underline{h}$ dagegen bildet $c — \underline{e} — g$ eine einzige Klangmasse, die dem Klang des C entspricht, und $\underline{h}$ ist ein vereinzelt nebenher gehender Ton. Die drei Töne $c — \underline{e} — g$ treten deshalb mit selbständiger Sicherheit auf, sich gegenseitig unterstützend und haltend. Die vereinzelte Septime $\underline{h}$ dagegen muß sich ohne Unterstützung gegen die Übermacht der anderen halten, was sie sowohl in der Ausführung durch den Sänger, wie im Verständnis des Hörers nur kann, wenn ihr melodischer Fortschritt sehr einfach und leicht verständlich gehalten ist. Deshalb sind für diese eine Note besondere Regeln der Stimmführung zu beobachten, während der Einsatz des c, welches seine hinreichende Sicherheit in dem Akkord selbst findet, ganz frei und ungehindert erfolgt. Dieser

praktische Unterschied in den Gesetzen der Stimmführung wird von den Musikern dadurch ausgedrückt, daß sie in diesem Falle $\underline{h}$ allein als den dissonanten Ton des Akkordes bezeichnen. Wenn auch diese Bezeichnung nicht gerade sehr passend gewählt ist, so können wir sie doch ferner unbedenklich gebrauchen, nachdem wir hier auseinander gesetzt haben, was ihr eigentlicher Sinn ist.

Wir gehen nun dazu über, für die einzelnen von uns gefundenen Septimenakkorde festzustellen, welchen Klang sie vertreten, und welches ihre dissonanten Töne sind.

1. Der Dominantseptimenakkord $g - \underline{h} - d - f$ enthält drei Töne, welche dem Klang G angehören, nämlich g, $\underline{h}$ und a, während die Septime f der dissonante Ton ist. Indessen ist zu bemerken, daß diese kleine Septime $g - f$ dem Verhältnis 4:7, welches fast genau durch das Intervall $g - \underline{f}$ hergestellt wäre, schon so nahe liegt, daß der Ton f allenfalls als siebenter Partialton des Klanges G gelten kann. Genauer wäre dieser Klang darzustellen durch $g - \underline{h} - d - \underline{f}$. Sänger wandeln auch wohl leicht das f des Septimenakkordes in $\underline{f}$ um, teils weil es in der Regel nach unten auf $\underline{e}$ fortschreitet, teils weil sie durch diese Umwandlung einen milder klingenden Akkord erzielen. Das wird namentlich leicht geschehen, wenn in dem vorausgegangenen Akkord der Klang des f nicht mittels einer nahen Verwandtschaft festgestellt ist. Also z. B. wenn zu dem schon liegenden konsonanten Akkord $g - \underline{h} - d$ später noch ein f hinzutreten soll, wird dieses leicht ein $\underline{f}$ werden, weil f mit keinem der Töne g, $\underline{h}$ oder d nahe verwandt ist. Trotzdem also der Dominantseptimenakkord ein dissonanter Akkord ist, so liegt doch selbst sein dissonanter Ton dem entsprechenden Partialton im Klang der Dominante so nahe, daß der ganze Akkord sehr wohl als Vertreter des Klanges der Dominante angesehen werden kann. Eben deshalb ist denn auch die Septime dieses Akkordes von manchen Beschränkungen der Stimmführung befreit, denen man die dissonanten Septimen sonst unterwirft. Man erlaubt namentlich, daß sie frei und sprungweise einsetzen darf, was in anderen Fällen nicht erlaubt ist. In modernen Kompositionen (Richard Wagner) tritt auch nicht ganz selten ein Septimenakkord als Schlußakkord untergeordneter Abschnitte des Satzes ein.

Der Dominantseptimenakkord spielt in der neueren Musik deshalb nächst dem tonischen Akkord die wichtigste Rolle. Er be-

zeichnet genau die Tonart, genauer als der einfache Dreiklang der Dominante $g—\underline{h}—d$ und genauer als der verminderte Dreiklang $\underline{h}—d—f$. Als Dissonanzakkord drängt er zur Auflösung in den tonischen Akkord, was der einfache Dreiklang der Dominante nicht tut. Dazu kommt endlich noch, daß sein Wohlklang außerordentlich wenig getrübt ist, so daß er der mildeste aller dissonanten Akkorde ist. Wir sind deshalb in der neueren Musik kaum noch imstande, ihn zu entbehren. Erfunden ist er im Anfang des 17. Jahrhunderts durch Monteverde, wie es scheint.

2. Der Septimenakkord auf der Sekunde der Durtonart, $d—f—\underline{a}—c$, enthält drei Töne, welche dem Klang F angehören, nämlich f, $\underline{a}$ und c. D ist bei genauer Intonation dissonant zu allen drei Tönen des Akkordes, und als die dissonante Note desselben zu betrachten. Die fundamentale Lage dieses Akkordes ist also die, welche schon Rameau als solche aufgefaßt hat, und worin F als Grundton erscheint: $f—\underline{a}—c'—d'$, also die Quintsextenlage oder, wie Rameau sie nennt, der Akkord der großen Sexte. In dieser Lage pflegt der Akkord auch in der Kadenz der C-Durtonart zu erscheinen. Seine Deutung und Beziehung zur Tonart ist wiederum sicherer, als die des früher besprochenen falschen Mollakkordes $d—f—\underline{a}$, welcher in der Ausführung durch den Sänger und bei ungenauer Stimmung der Verwechselung mit $\underline{d}—f—\underline{a}$ aus der $\underline{A}$-Molltonart unterworfen ist. Wir gelangen in einen konsonanten Akkord, wenn wir $d—f—\underline{a}$ in $\underline{d}—f—\underline{a}$ verwandeln. Die Neigung dazu wird sehr groß sein, sobald in der melodischen Fortschreitung die Verwandtschaft des d zum G nicht sehr stark hervorgehoben ist. Wollten wir aber auch in dem Akkord $d—f—\underline{a}—c$ das d in $\underline{d}$ verwandeln, so würden wir es dadurch zwar gegen f und a konsonant machen, aber nicht gegen c. Im Gegenteil ist die Dissonanz $\underline{d}—c$ schärfer als $d—c$, und es würde immer nur der Ton $\underline{a}$ in den Klang des $\underline{d}$ eintreten, so daß trotz dieser Änderung f, welches drei Töne des Akkordes in seinen Klang vereinigt, das Übergewicht als Grundton behalten würde über $\underline{d}$, welches nur zwei vereinigt. Ich finde dementsprechend, daß auf dem natürlich gestimmten Harmonium der Akkord $f—\underline{a}—c—d$, als Subdominantenakkord von C-Dur, eine bessere Wirkung macht als $f—\underline{a}—c—\underline{d}$.

3. Der entsprechende Septimenakkord auf der Sekunde der Molltonart $d—f—\overline{as}—c$ enthält nur den Ton c, welcher als Bestandteil entweder des Klanges f oder des Klanges $\overline{as}$ betrachtet werden kann. Da aber c der dritte Partialton von f und erst der fünfte von $\overline{as}$ ist, so hat auch hier in der Regel f das Übergewicht als Grundton, und der Akkord ist zu betrachten als Subdominantenakkord $f—\overline{as}—c$ mit Zusatz des dissonanten Tones d. Zur Veränderung des d in $\underline{d}$ ist hier noch weniger Veranlassung als in dem entsprechenden Durakkord.

4. Der Septimenakkord auf der Septime der Durtonart $\underline{h}—d—f—\underline{a}$ enthält zwei Töne $\underline{h}$ und d, welche dem Klang der Dominante G angehören, und zwei, nämlich f und $\underline{a}$, welche in den Klang F gehören. Der Akkord zerfällt also in zwei gleich gewichtige Hälften. Indessen ist zu bemerken, daß die beiden Töne f und $\underline{a}$ den beiden nächsten Partialtönen des G-Klanges außerordentlich nahe kommen. Die Töne des G-Klanges vom vierten ab können nämlich geschrieben werden:

$$\begin{array}{cccccc} g & \underline{h} & d & \underline{f} & g & a \\ 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{array}$$

So kann denn auch in der Tat der Nonenakkord $g—\underline{h}—d—f—\underline{a}$ den Klang der Dominante G vertreten, vorausgesetzt, daß man die Ähnlichkeit noch durch die Stellung der Töne deutlich erhält; G muß tiefster Ton und $\underline{a}$ höchster bleiben, auch wird es gut sein, wenn f nicht zu tief liegt. Da das a der neunte Partialton des Klanges G ist, welcher in allen gebräuchlichen Klangfarben sehr schwach ist, oft fehlt, da außerdem sowohl zwischen $\underline{f}$ und f, wie zwischen a und $\underline{a}$ der Unterschied eines Kommas bleibt, muß man eben in solcher Weise die Ähnlichkeit des Nonenakkordes mit dem G-Klang so groß wie möglich machen. Es wird dann die Abweichung zwischen $\underline{f}$ und f, a und $\underline{a}$ nicht sehr auffällig. Es sind in diesem Falle f und $\underline{a}$ als die dissonanten Noten des Nonenakkordes $g—\underline{h}—d—f—\underline{a}$ zu betrachten, weil sie sich zwar nahehin, aber doch nicht genau dem G-Klang einfügen. Die Eintrittsweise des $\underline{a}$ ist aus demselben Grunde wie die des f im Dominantseptimenakkord $g—\underline{h}—d—f$ unbehindert. Nun kann man endlich einzelne Töne des fünfstimmigen Nonenakkordes weglassen, um

ihn vierstimmig zu machen, z. B. seine Quinte oder auch seinen Grundton

$$g — \underline{h} — f — \underline{a} \quad \text{oder} \quad \underline{h} — d — f — \underline{a}.$$

Vorausgesetzt, daß man die Ordnung der Töne möglichst bewahrt, namentlich $\underline{a}$ als höchsten Ton erhält, wird der Akkord immer noch als *G*-Klang wiedererkannt werden können und diesen vertreten.

Hierin scheint mir einfach der Grund zu liegen, warum die Musiker es wünschenswert finden, das $\underline{a}$ des Akkordes $\underline{h} — d — f — \underline{a}$ den obersten Ton bilden zu lassen. Hauptmann stellt dies sogar unbedingt als Regel auf, indem er eine ziemlich künstliche Begründung dieser Regel gibt. Es wird dadurch die Zweiheit dieses Akkordes, soweit es möglich ist, aufgehoben, und er bekommt eine deutlich verständliche Beziehung zur Dominante der *C*-Durtonart, während bei anderen Lagen desselben Akkordes die Verwechselung mit dem Subdominantenakkord von $\underline{A}$-Moll nahe liegen wird. Übrigens klingt nun auch bei reiner Stimmung der aus den Partialtönen des *G*-Klanges zusammengestellte Akkord $g — \underline{h} — d — f' — a'$ sehr weich und wenig dissonant. Der Nonenakkord der *C*-Durtonart $g — \underline{h} — d' — f' — \underline{a}'$ und der Septimenakkord in der Lage $\underline{h} — d' — f' — \underline{a}'$ klingen etwas rauher, wegen der pythagoreischen Terz $d' — f'$ und der unreinen Quinte $d' — \underline{a}'$, aber sie sind nicht sehr scharf. Dagegen werden sie sehr rauh, wenn man das $\underline{a}'$ tiefer legt.

Der Septimenakkord $\underline{h} — d — f — \underline{a}$ mit dem darauf folgenden Dreiklang $c — \underline{e} — g$ enthält, wie schon vorher bemerkt ist, sämtliche Töne der *C*-Durtonleiter, so daß diese Akkordverbindung die Tonart sehr kurz und vollständig feststellt.

5. Der verminderte Septimenakkord $\underline{h} — d — f — \overline{as}$ teilt die letztere Eigenschaft mit dem entsprechenden Akkord der Durtonart, er wird deshalb und wegen seiner großen Veränderlichkeit in der neueren Musik außerordentlich viel, vielleicht übermäßig viel zu Modulationen benutzt. Er enthält keinen Ton, der zu dem Klang irgend einer anderen Note des Akkordes gehörte, wohl aber kann man die drei Töne $\underline{h} — d — f$ als dem Klang der Dominante *G* angehörig betrachten, daher er auch als Nonenakkord in der Zusammensetzung

$$g — \underline{h} — d — f — \overline{as}$$

vorkommt. Er vertritt deshalb unvollkommen den Klang der Dominante mit Einfügung des fremden Tones $\overline{as}$, und man kann f und $\overline{as}$ als

die dissonanten Töne dieses Akkordes ansehen. Der Zusammenhang der drei Töne $\underline{h}—d—f$ im *G*-Klang ist aber nicht so hervortretend, daß die Töne f und $\overline{as}$ in ihrer Bewegung den Tönen $\underline{h}$ und d entschieden untergeordnet wären. Man läßt sie frei einsetzen und löst den Akkord durch Fortgang aller seiner Töne in möglichst kleinen Schritten auf, da er in sich nicht einen so festen Zusammenhang hat, daß er große Schritte erlauben würde.

6. Die Septimenakkorde mit großer Septime im unverwendeten Akkordsystem der Tonart $f—\underline{a}—c—\underline{e}$ und $c—\underline{e}—g—\underline{h}$ in *C*-Dur, $\overline{as}—c—\overline{es}—g$ in *C*-Moll repräsentieren, wie schon früher bemerkt wurde, hauptsächlich einen Durakkord mit der großen Septime als dissonantem Ton. Die große Septime bildet eine ziemlich harte Dissonanz und steht in sehr entschiedenem Widerspruch mit dem unterliegenden Klang, in welchen sie ganz entschieden nicht hineinpaßt.

7. Die Septimenakkorde mit kleiner Septime im unverwendeten System, $\underline{a}—c—\underline{e}—g$ und $\underline{e}—g—\underline{h}—d$, lassen allerdings den Klang ihrer Terz am meisten hervortreten, dem ihr Grundton als beigefügt erscheint. $c—\underline{e}—g—\underline{a}$ ist der *C*-Klang mit zugefügtem $\underline{a}$, $g—\underline{h}—d—\underline{e}$ der *G*-Klang mit zugefügtem $\underline{e}$. Da aber $c—\underline{e}—g$ und $g—\underline{h}—d$ die oft wiederkehrenden Hauptakkorde der Tonart sind, so macht die Anfügung des $\underline{a}$ oder $\underline{e}$ in jenen Septimenakkorden durch den Kontrast einen verhältnismäßig stark hervortretenden Eindruck; außerdem sind die Grundtöne jener Septimenakkorde nicht so isoliert, wie der des Akkordes $d—f—\underline{a}—c$, welcher keine reine Quinte im Akkord hat. Das $\underline{a}$ in $\underline{a}—c—\underline{e}—g$ hat die Quinte $\underline{e}$ und allenfalls auch die Septime g, die seinem Klang angehören; ebenso kann man in $\underline{e}—g—\underline{h}—d$ das $\underline{h}$ und d dem Klang $\underline{e}$ zurechnen. Daher sind die Töne $\underline{a}$ im ersten und $\underline{e}$ im zweiten auch nicht notwendig den Stimmführungsgesetzen der Dissonanzen unterworfen.

Die Harmoniker pflegen als normale Lage aller dieser Akkorde immer die des Septimenakkordes zu betrachten, und dessen Grundton als Hauptton des Akkordes. Vielleicht wäre es natürlicher, $c—\underline{e}—g—\underline{a}$ als Hauptlage des Akkordes $\underline{a}—c—\underline{e}—g$ zu betrachten, und *C* als Fundamentalton. Letzterer Akkord ist aber ein *C*-Klang mit Hinneigung zum $\underline{a}$, und in den Modulationen wird gerade diese Ein-

mischung des $\underline{a}$-Klanges benutzt, um nach den Verwandten von $\underline{a}$, die nicht mit dem Akkord $c - \underline{e} - g$ verwandt sind, hinzuschreiten, nämlich nach $\underline{d} - f - \underline{a}$. Ebenso kann man von $g - \underline{h} - d - \underline{e}$ nach $\underline{a} - c - \underline{e}$ schreiten, was von $g - \underline{h} - d$ aus immer ein Sprung wäre. Für die Modulation sind also allerdings $\underline{a}$ und $\underline{e}$ wesentliche Bestandteile des Akkordes, und in dieser praktischen Rücksicht kann man ihnen auch wohl den Namen der Fundamentaltöne der betreffenden Akkorde lassen.

8. Der Septimenakkord auf der Tonika der Molltonart $c - \overline{es} - g - \underline{h}$ wird selten gebraucht, weil das h wesentlich der aufwärtsschreitenden Bewegung in der Molltonart angehört, die regelmäßig sich auflösende Septime aber sinken muß. So würde es immer besser sein, den Akkord $c - \overline{es} - g - \overline{b}$ zu bilden, der dann den unter 7. genannten Akkorden ähnlich ist.

Achtzehnter Abschnitt.

Gesetze der Stimmführung.

Wir haben bisher immer nur die Beziehungen der Töne eines Musikstückes mit der Tonika, seiner Akkorde mit dem tonischen Akkord betrachtet. Auf diesen Beziehungen beruht die Verbindung der Klangmasse zu einem zusammenhängenden Ganzen. Abgesehen davon besteht aber auch das Bedürfnis, die unmittelbar aufeinander folgenden Töne und Akkorde durch natürliche Beziehungen miteinander verbunden zu sehen. Dadurch wird die künstlerische Verbindung der Klangmasse eine noch innigere, und im allgemeinen wird immer eine solche Verbindung erstrebt werden müssen, wenn auch ausnahmsweise für besondere Zwecke des Ausdruckes eine heftigere und weniger verbundene Art der Fortschreitung gewählt werden kann. Wir haben schon bei der Entwickelung der Tonleiter gesehen, daß das Gefühl für die Verbindung des Ganzen durch die Verwandtschaft zur Tonika anfangs gar nicht oder undeutlich entwickelt war, daß vielmehr an Stelle eines solchen Zusammenhanges nur die kettenweise Verbindung einer Quintenreihe bestand, daß wenigstens nur diese so entwickelt war, um sich in den theoretischen Betrachtungen der Pythagoreer über den Bau des Tonsystemes bis zur bewußten Anerkennung durchzuarbeiten. Aber auch neben dem stark entwickelten Gefühl für die Tonika, wie es in der neueren harmonischen Musik herrscht, ist das Bedürfnis kettenweiser Verbindung der einzelnen Töne und Akkorde nicht verloren gegangen, wenn auch in die Quintenkette, welche ursprünglich die Töne der Tonart verband, z. B.:

$$f — c — g — d — a — e — h,$$

durch die Einführung der richtigen Terzen eine Unterbrechung gekommen ist:

$$f — c — g — d \mid \underline{d} — \underline{a} — \underline{e} — \underline{h}.$$

Die musikalische Verbindung zwischen zwei aufeinander folgenden Noten kann hergestellt sein:

1. Durch Verwandtschaft der Klänge. Diese ist entweder:

a) Direkt, wo zwischen den aufeinander folgenden Tönen ein reines konsonantes Intervall besteht; dann ist nämlich, wie wir früher gesehen haben, stets einer der deutlich vernehmbaren Partialtöne des ersten Klanges gleich einem solchen des zweiten. Dadurch ist die Tonhöhe des folgenden Klanges für das Gefühl sicher festgestellt. Dies ist die beste und sicherste Art der Verbindung. Die engste Verwandtschaft dieser Art besteht beim Sprung um eine Oktave, der aber melodisch nur in der Baßstimme häufiger gebraucht wird, in der Oberstimme selten, weil er eine zu plötzliche Änderung in der Tonhöhe verlangt. Daran schließt sich der Sprung in die Quinte und Quarte, welche beide noch sehr bestimmt und klar sind; dann folgen die Schritte um große Sexten und Terzen, welche noch leicht und bestimmt getroffen werden, während die Schritte über kleine Sexten und Terzen schon anfangen, etwas Unsicheres zu bekommen. Es ist in ästhetischer Beziehung zu bemerken, daß die Fortschritte um große Sexten und Terzen, ich möchte sagen, den größten Grad gesättigter Schönheit unter den genannten melodischen Schritten haben, was vielleicht damit zusammenhängt, daß sie an der Grenze der deutlich verständlichen Schritte liegen. Die Schritte in Quinten und Quarten sind zu klar, sie klingen deshalb gleichsam trocken verständig; die in kleinen Terzen und namentlich in kleinen Sexten fangen an, unbestimmt zu klingen. Dagegen haben die großen Terzen und großen Sexten das richtige Gleichgewicht zwischen Licht und Dunkel. Ähnlich scheint sich auch in der Harmonie die große Sexte und Terz den übrigen Konsonanzen gegenüber zu verhalten.

b) Oder die Verwandtschaft ist indirekt und nur von zweitem Grade. Eine solche findet sich bei allen stufenweisen Fortschritten innerhalb der Skala um halbe oder ganze Töne vor. Also z. B.:

$$\underbrace{c-d}_{G} \quad \underbrace{d-e}_{G} \quad \underbrace{e-f}_{C}.$$

Der große ganze Ton $c-d$ schreitet von der Quarte zur Quinte des subintendierten Tones G, welchen Rameau als Fundamentalbaß zu dem genannten melodischen Fortschritt hinzugefügt dachte. Der

kleine ganze Ton $d — \underline{e}$ schreitet von der Quinte zur großen Sexte des Hilfstones G, der halbe Ton $\underline{e} — f$ von der großen Terz zur Quarte des Hilfstones C. Wenn aber der Hilfston dem Sänger und dem Hörer leicht zur Hand sein soll, muß er einer der Haupttöne der Tonart sein. So erregt der Schritt $\underline{a} — \underline{h}$ in der C-Durtonleiter den Sängern einen kleinen Anstoß, obgleich es ein Fortschritt um einen großen ganzen Ton ist, der an dem Hilfston $\underline{e}$ leicht gemacht werden kann. Aber der Klang des $\underline{e}$ liegt nicht so fest und bereit in der Erinnerung, wie der von C und seinen Quinten G und F. Daher brach das Hexachord des Guido von Arezzo, welches während des ganzen Mittelalters die normale Sängerskala war, mit der Sexte ab [1]). Dies Hexachord wurde von verschiedenen Grundtönen ausgehend gesungen, aber dieselbe Melodie bildend:

	Ut	*Re*	*Mi*	*Fa*	*Sol*	*La*
entweder	*G*	*A*	*H*	*C*	*D*	*E*
oder . .	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*A*
oder . .	*F*	*G*	*A*	*B*	*C*	*D*

Darin bildet das Intervall $Mi — Fa$ immer den Halbton.

Eben deshalb zog Rameau es vor, in der Molltonart die Schritte $d — \overline{es}$ und $\overline{es} — f$ lieber am G und C, als Hilfstönen, sich bilden zu lassen, als am B, der Septime der absteigenden Leiter, welche keine genügend starke Verwandtschaft zur Tonika hat, und deshalb als Hilfston nicht fest genug im Sinn des Sängers liegt. Nimmt man für $d — \overline{es}$ das nächst höhere g als Hilfston, so geschieht der Schritt von dessen Unterquarte zur großen Unterterz, und $\overline{es} — f$ ist der Schritt von der großen Untersexte zur Unterquinte des nächst höheren c. Dagegen kann der Schritt $\overline{as} — \underline{h}$ in der Molltonleiter in keiner Weise auf eine Verwandtschaft zweiten Grades zurückführen. Er ist deshalb auch entschieden unmelodisch und mußte in der alten homophonen Musik ganz vermieden werden, ebenso wie die Schritte in falschen Quinten und Quarten, z. B. $\underline{h} — f'$ oder $f' — \underline{h'}$. Daher denn die schon

[1]) Alembert erklärt aus demselben Grund die Begrenzung des altgriechischen Heptachordes aus zwei verbundenen Tetrachorden:

$$h — c — d — e — f — g — a,$$

in welchem der Schritt $a — h$ vermieden ist. Aber die Erklärung würde nur für eine solche Tonart passen, in welcher c die Tonika bildet, was in der altgriechischen Leiter wohl nicht der Fall war.

oben besprochenen Änderungen der aufsteigenden und absteigenden Molltonleiter.

In der neueren harmonischen Musik sind nun viele dieser Schwierigkeiten weggefallen oder weniger fühlbar geworden, weil eine richtig geführte Harmonisierung diejenigen Verbindungen herstellen kann, welche dem melodischen Fortschritt der einzelnen Stimme fehlen. Es ist deshalb auch viel leichter eine unbekannte Stimme eines mehrstimmigen Satzes aus einem Klavierauszug, der die Harmonie angibt, zu singen, als aus einer einzelnen ausgeschriebenen Stimme. Aus jenem erkennt man das Verhältnis des zu singenden Tones zur ganzen Harmonie, aus letzterer nur zu den nächstbenachbarten Tönen der eigenen Stimme.

2. Töne können in musikalische Verbindung treten durch ihre Nachbarschaft in der Tonhöhe. Wir haben dieses Verhältnis schon besprochen in Beziehung auf den Leitton. Es gilt dasselbe auch für die Ausfüllungstöne in chromatischen Gängen; wenn wir z. B. in *C*-Dur statt *C — D* singen *C — Cis — D*, so hat das *Cis* gar keine Verwandtschaft ersten oder zweiten Grades zur Tonika *C*, es hat auch keine harmonische oder modulatorische Bedeutung; es ist nichts als eine zwischen beide Töne eingeschobene Stufe, welche zur Tonleiter nicht gehört, und nur dazu dient, die stufenweise Bewegung in der Tonleiter der überschleifenden Bewegung des natürlichen Sprechens, Weinens oder Heulens ähnlicher zu machen. Die Griechen haben diese Teilung in ihrem enharmonischen System, wo sie eine Halbtonstufe in zwei Schritte teilten, noch weiter getrieben, als wir es jetzt tun. Ein chromatischer Fortschritt in halben Tönen geschieht eben trotz der Fremdartigkeit des zu erreichenden Tones mit so ausreichender Sicherheit, daß er auch in modulatorischen Übergängen gebraucht werden kann, um ganz fernliegende Tonarten plötzlich zu erreichen.

Es ist besonders die italienische Melodiebildung reich an solchen Vorhalttönen. Untersuchungen über die Gesetze ihres Vorkommens finden sich in zwei Abhandlungen von Herrn A. Basevi[1]). Durchgehend ist die Regel befolgt, daß leiterfremde Töne nur eingeführt werden können, wenn sie um einen Halbton abstehen von der Note

[1]) Introduction à un nouveau Système d'Harmonie; traduit par L. Delâtre. Florence 1865. Studj sull' Armonia. Firenze 1865.

der Leiter, in welche sie sich auflösen, während leitereigene Töne frei einsetzen können gegen eine disharmonierende Begleitung, auch wenn sie zur Auflösung einen Ganztonschritt machen müssen.

Ebenso können auch Schritte in ganzen Tönen, wenn sie in der diatonischen Leiter gemacht werden, in solcher Weise vorkommen, daß sie nur als Vermittelung zwischen zwei anderen dienen, welche im Akkord liegen. Es sind dies die sogenannten Durchgangstöne. Wenn also z. B. zu dem fortklingenden *C*-Durdreiklang eine Stimme den Gang

$$c — d — \underline{e} — f — g$$

ausführt, so passen die Töne *d* und *f* nicht in den Akkord, haben auch gar keine Beziehung zu der Harmonie, sondern sind eben nur durch den melodischen Fortschritt der einzelnen Stimme begründet. Man läßt diese Durchgangstöne der Regel nach auf die nicht akzentuierten Taktteile fallen und gibt ihnen eine kurze Dauer. In obigem Beispiel würde man also *c*, *e* und *g* auf die guten, d. h. akzentuierten Taktteile legen. *D* bildet dann den Durchgangston zwischen *c* und *e*, *f* den zwischen *e* und *g*. Wesentlich aber für ihre Verständlichkeit ist es, daß sie nur in Stufen von halben oder ganzen Tönen eintreten; so geben sie eine leicht und ohne Widerstand fortgleitende melodische Bewegung, in der man die nicht akzentuierten dissonanten Töne fast überhört.

Auch in den wesentlich dissonanten Akkorden muß der Regel nach für den dissonanten Ton, welcher vereinzelt der Masse der übrigen Töne entgegentritt, ein möglichst leicht verständlicher und leicht zu treffender melodischer Fortschritt eingehalten werden. Und da das Gefühl für die natürlichen Verwandtschaften eines solchen vereinzelten Tones durch die gleichzeitig erklingenden anderen Töne, die sich der Wahrnehmung viel mächtiger aufdrängen, gleichsam übertäubt wird, so bleibt bloß der stufenweise diatonische Fortschritt übrig, um für den Sänger und den Hörer die Tonhöhe und die melodischen Beziehungen eines solchen dissonanten Tones festzustellen. Es wird deshalb der Regel nach verlangt werden müssen, daß ein dissonanter Ton nur stufenweise eintrete und sich auch nur stufenweise wieder weiterbewege.

Als wesentlich dissonante Akkorde sind solche zu betrachten, in denen die dissonanten Noten nicht bloß als durchgehende Noten über

einem liegenbleibenden Akkord eintreten, sondern entweder von einem eigenen Akkord begleitet sind, der von den vorhergehenden und nachfolgenden verschieden ist, oder doch durch ihre Dauer und Akzentuation sich so hervordrängen, daß sie der Aufmerksamkeit des Hörers sich nicht entziehen können. Es ist schon oben bemerkt worden, daß diese dissonanten Akkorde nicht um ihrer selbst willen, sondern hauptsächlich als Mittel, das Gefühl des Vorwärtsstrebens in dem Satz zu erhöhen, gebraucht werden können. Daraus folgt denn für die Bewegung des dissonanten Tones, daß, wenn derselbe in den Akkord schrittweise eintritt und wieder aus ihm austritt, er entweder beide Male steigen oder beide Male fallen muß. Ließe man ihn dagegen in dem dissonanten Akkord seine Bewegung umkehren, so würde die Dissonanz unmotiviert erscheinen. Dann wäre es passender gewesen, den betreffenden Ton in seiner konsonanten Lage liegen zu lassen, ohne daß er sich bewegte. Eine Bewegung, welche zu ihrem Ausgangspunkt gleich wieder zurückkehrt und dabei Dissonanz hervorbringt, unterbleibt besser; sie hat kein Ziel.

Zweitens kann man als Regel aufstellen, daß die Bewegung des dissonanten Tones nicht so gerichtet sein darf, daß sie die Dissonanz aufhebt, wenn die übrigen Teile des Akkordes liegen blieben. Denn eine Dissonanz, die von selbst sich aufheben würde, wenn man nur wartet, bis ihr nächster Schritt erfolgt ist, bringt eben keinen Antrieb zum Fortschritt der Harmonie hervor. Sie klingt deshalb matt und ungerechtfertigt. Dies ist der Hauptgrund, warum Septimenakkorde, wenn sie sich unter Fortschreitung der Septime auflösen sollen, nur die Fortschreitung der Septime nach unten zulassen. Denn wenn die Septime in der Tonleiter stiege, würde sie zur Oktave des Grundtones werden und die Dissonanz des Akkordes aufgehoben sein. Es kommen bei Bach, Mozart und anderen solche Fortschreitungen im Dominantseptimenakkord vor; dann klingt die Septime aber eben nur wie ein Durchgangston und muß wie ein solcher behandelt werden. Dann ist sie für die Fortschreitung der Harmonie gleichgültig.

Am vollständigsten gesichert ist die Tonhöhe eines einzelnen dissonanten Tones einem mehrstimmigen Akkord gegenüber, wenn jener dissonante Ton schon vorher als Konsonanz in dem vorausgehenden Akkord vorhanden gewesen war und einfach festgehalten

wird, während der neue Akkord einsetzt. Wenn wir also folgen lassen die Akkorde:

$$G — d — g — \underline{h},$$
$$c — \underline{e} — g — \underline{h},$$

so ist das h im ersten Akkord durch die Konsonanz mit G festgestellt; es bleibt einfach liegen, wenn nun die Töne c und $\underline{e}$ einsetzen, und es wird dadurch zur Dissonanz in dem Septimenakkord $c — \underline{e} — g — \underline{h}$. Eine solche Dissonanz nennt man vorbereitet. Es war dies die einzig erlaubte Art, Dissonanzen einzuführen, bis zum Ende des 16. Jahrhunderts. Die vorbereiteten Dissonanzen machen eine besonders kräftige Wirkung; ein Teil des vorausgehenden Akkordes zögert zu weichen und muß durch den folgenden erst gewaltsam aus seiner Stelle gedrängt werden. Es wird so das Drängen zum Fortschritt trotz entgegenstehenden Widerstandes, der nur zögernd weicht, sehr wirksam ausgedrückt. Eben deshalb muß aber auch der neu einsetzende Akkord ($c — \underline{e} — g$ im letzten Beispiel) auf einem kräftig akzentuierten Taktteil einsetzen; sonst fehlt ihm der Ausdruck der Kraftanstrengung. Die Lösung der vorbereiteten Dissonanz dagegen fällt natürlich auf einen nicht akzentuierten Taktteil. Es klingt überhaupt nichts schlechter, als wenn Dissonanzen zaghaft und unsicher gespielt oder gesungen werden. Dann sind sie einfach mißklingend. Gerechtfertigt sind sie in der Regel nur, wenn sie Energie und kräftiges Vorwärtstreiben ausdrücken.

Solche vorbereitete Dissonanzen, sogenannte Vorhalte, können nun in mannigfachen anderen Akkorden vorkommen, als in Septimenakkorden, z. B.:

Vorbereitung . . . $G — c — \underline{e}$,
Vorhaltsakkord . . $G — c — d$,
Auflösung . . . . $G — \underline{H} — d$.

Der Ton c ist die vorbereitete Dissonanz; im zweiten Akkord, welcher auf einen akzentuierten Taktteil fallen muß, tritt d, die Quinte von G, ein und erzeugt die Dissonanz $c — d$; nun muß c weichen, und zwar von d sich entfernend, nach dem zweiten oben aufgestellten Gesetz, wodurch die Auflösung $G — \underline{H} — d$ entsteht. Man kann auch die Akkorde in umgekehrter Ordnung sich folgen lassen, so daß d die vorbereitete Dissonanz ist, die von c aus der Stelle gedrängt wird. Dies ist aber weniger gut, weil dem weichenden Ton meistens die

absteigende Bewegung besser ziemt, als die ansteigende. Gesteigerte Tonhöhe macht uns unwillkürlich immer den Eindruck größerer Anstrengung, da wir unsere Stimme stärker anstrengen müssen, um hohe Töne zu erreichen. Der dissonante Ton, welcher der größeren Gewalt weichen muß, schreitet besser nach unten, als daß er durch eigene Anstrengung gleichsam sich erhebt. Doch kann auch das letztere unter Umständen passen, und es kommen Beispiele genug davon vor.

Im anderen Falle, wenn die Dissonanz nicht vorbereitet ist, sondern mit dem Akkord, in welchem sie Dissonanz ist, gleichzeitig einsetzt, ein Fall, der hauptsächlich bei den Septimenakkorden häufig eintritt, ist die Bedeutung der Dissonanz eine andere. Da die frei eintretenden Septimen der Regel nach absteigend eintreten müssen, so kann man sie sich stets als aus der Oktave des Grundtones ihres Akkordes absteigend denken, indem man sich zwischen den vorausgehenden und dem Septimenakkord einen konsonanten Dur- oder Mollakkord vom Grundton des letzteren eingeschoben denkt. In diesem Falle kündet also die eintretende Septime nur an, daß dieser konsonante Akkord gleich wieder im Zerfallen begriffen ist, und daß die Harmonie durch melodische Bewegung einem neuen Ziel zueilt. Dieses Ziel, der Auflösungsakkord, muß betont werden; der Eintritt der Dissonanz fällt deshalb notwendig auf den vorhergehenden nicht akzentuierten Taktteil.

Der Eintritt eines vereinzelten dissonanten Tones kann eben der Regel nach einem mehrstimmigen Akkord gegenüber nicht als Ausdruck einer Kraftanstrengung benutzt werden, wohl aber der Eintritt eines Akkordes einem einzelnen Ton gegenüber, vorausgesetzt, daß dem einzelnen dissonanten Ton nicht eine überwiegende Tonstärke gegeben wird. Deshalb liegt es in der Natur der Sache, daß das erstere auf nicht akzentuierten Taktteilen, das letztere auf akzentuierten geschieht.

Von der Befolgung dieser Regeln, welche den Eintritt der Dissonanzen betreffen, kann man vielfältig absehen bei den Septimenakkorden des verwendeten Systemes, in denen die Quarte und Sekunde der Tonart vorkommen, und Töne der Unterdominantseite mit solchen der Oberdominantseite gemischt sind. Diese Akkorde können noch zu einem anderen Zweck eingeführt werden, als um den dynamischen Eindruck der fortschreitenden Harmonie zu steigern. Sie haben näm-

lich auch die Wirkung, den Umfang der Tonart dem Gefühl des Hörers fortdauernd gegenwärtig zu erhalten, und ihre Existenz ist durch diesen Zweck gerechtfertigt.

Vom Akkord der Tonika *C* aus können sich einige Stimmen sehr wohl den Tönen der Oberdominantseite $g — \underline{h} — d$ zuwenden, andere denen der Unterdominantseite $f — \underline{a} — c$ oder $f — \overline{as} — c$, und jede Stimme wird die Lage ihres Tones mit vollkommener Sicherheit finden können, auf das Gefühl einer nahen Verwandtschaft gestützt. Wenn dann freilich der dissonante Akkord eingetreten ist, werden die dissonanten Töne, bei denen das Gefühl für ihre ferneren natürlichen Verwandtschaften übertäubt wird durch den gleichzeitig dazu erklingenden fremdartigen Akkord, nach der Regel der sich auflösenden Dissonanzen fortschreiten müssen. Ein Sänger z. B., welcher in dem Akkord $g — \underline{h} — d — f$ das *f* singt, würde vergebens versuchen, sich vorzustellen, wie das dem *f* verwandte $\underline{a}$ klingen muß, um etwa nach diesem herauf- oder herabzuspringen; wohl aber kann er den engen Halbtonschritt nach $\underline{e}$ in den Akkord $g — c — \underline{e}$ hinein sicher ausführen. Dagegen kann sehr wohl das *g*, welches seinen eigenen Klang durch den Septimenakkord annähernd dargestellt findet, nach seinen verwandten Tönen, *c* z. B., springend sich fortbewegen, oder $\underline{h}$ nach *g*.

In den Akkorden $\underline{h} — d \mid f — \underline{a}$ und $\underline{h} — d \mid f — \overline{as}$, in denen weder die Dominantseite noch die Unterdominantseite überwiegt, wird es überhaupt nicht ratsam sein, einen der Töne springend fortschreiten zu lassen.

Auch wird es nicht ratsam sein, aus einem anderen Akkord als dem tonischen springend in die Akkorde des verwendeten Systemes überzugehen, weil nur der tonische Akkord die gleichzeitige Verwandtschaft zu dem Dominant- und dem Subdominantakkord hat.

Zu den Septimenakkorden des unverwendeten Systemes ist ein Übergang von einem anderen, beiden Enden des Septimenakkordes verwandten Akkord nicht möglich; daher bei diesen die Dissonanz nach den strengen Regeln eintreten muß.

Über die Behandlung des Subdominantenakkordes mit zugefügter Sexte $f — \underline{a} — c — d$ in *C*-Dur sind die Ansichten der Musiker geteilt. Am richtigsten ist wohl die Vorschrift von Rameau, als den dissonanten Ton das *d* anzusehen, welches ansteigend nach $\underline{e}$ die Disso-

nanz auflösen muß. Auch ist dies entschieden die wohlklingendste Art der Auflösung. Die neueren Theoretiker betrachten diesen Akkord dagegen als Septimenakkord von *d*, und sehen *c* als Dissonanz an, welche absteigend sich lösen muß, während *d*, wenn *c* liegen bleibt, sich ganz frei bewegt, also namentlich auch absteigend fortschreiten könnte.

Akkordfolgen: Ebenso wie die ältere homophone Musik kettenweise Verwandtschaft der Töne einer Melodie verlangte, strebt die neuere Musik nach kettenweiser Verbindung der Akkorde eines Harmoniegewebes, wogegen sie sich in der melodischen Folge der einzelnen Töne viel größere Freiheiten erlauben kann, da durch die Harmonie die natürlichen Verwandtschaften der Töne viel entschiedener und eindringlicher bezeichnet werden, als in der homophonen Melodie. Das Verlangen nach kettenweiser Verwandtschaft der Akkorde war im 16. Jahrhundert noch wenig entwickelt. Bei den großen italienischen Meistern dieser Zeit folgen sich die der Tonart angehörigen Akkorde oft in den auffallendsten Sprüngen, die wir gegenwärtig nur in seltenen Ausnahmen zulassen würden. Während des 17. Jahrhunderts dagegen entwickelte sich das Gefühl auch für diese Eigentümlichkeit der Harmonie, daher wir denn die hierauf bezüglichen Regeln bei Rameau schon bestimmt ausgesprochen finden im Anfang des 18. Jahrhunderts. Mit Bezug auf den von ihm aufgestellten Begriff des Fundamentalbasses sprach Rameau diese Regel so aus: „Der Fundamentalbaß darf der Regel nach nur in reinen Quinten oder Terzen auf- oder abwärtsschreiten.“ Nach unserer Darstellung ist der Fundamentalbaß eines Akkordes derjenige Klang, welcher entweder allein oder wenigstens vorzugsweise durch die Töne des Akkordes dargestellt wird. In diesem Sinn genommen fällt Rameaus Regel mit der der melodischen Fortschreitung eines einzelnen Tones zu nächstverwandten Tönen zusammen. Wie die Stimme einer Melodie darf auch der Akkordklang nur zu nächstverwandten Tönen fortschreiten. Fortschreitung nach einer Verwandtschaft zweiten Grades ist aber bei Akkorden viel schwerer zu motivieren, als bei einzelnen Tönen, und ebenso Fortschreitung in kleinen diatonischen Stufen ohne Verwandtschaft. Deshalb ist Rameaus Regel für die Fortschreitung des Fundamentalbasses im ganzen strenger, als die Regeln für melodische Fortschreitung einer einzelnen Stimme.

Nehmen wir z. B. den Akkord $c-\underline{e}-g$, der dem C-Klang entspricht, so können wir von diesem in Quinten zum G-Klang $g-\underline{h}-d$, oder zum F-Klang fortschreiten, $f-\underline{a}-c$. Die beiden letzteren Akkorde haben je einen Ton, bzw. g und c, mit dem Akkord $c-\underline{e}-g$ gemeinsam, sind ihm also direkt verwandt.

Wir können aber auch den Klang in Terzen fortschreiten lassen; dann bekommen wir Mollakkorde, wenn wir die Tonart nicht verlassen wollen. Der Übergang vom Klang C zum Klang $\underline{E}$ wird ausgedrückt durch die Folge der Akkorde $c-\underline{e}-g$ und $\underline{e}-g-\underline{h}$, welche durch zwei Töne verwandt sind. Ähnlich ist die Folge $c-\underline{e}-g$ und $\underline{a}-c-\underline{e}$ vom C-Klang zum $\underline{A}$-Klang. Die letztere ist sogar noch natürlicher als die erstere, weil der Akkord $\underline{a}-c-\underline{e}$ einen unreinen $\underline{A}$-Klang mit eingemischtem C-Klang darstellt, der vorher bestehende C-Klang also auch mit zwei Tönen im folgenden Akkord erhalten bleibt, während diese Beziehung im ersten Falle nicht besteht.

Wir können aber, wenn wir die Tonart C-Dur verlassen wollen, auch den Schritt zu den reinen Terzenklängen machen, also von $c-\underline{e}-g$ zu $\underline{e}-\underline{\underline{gis}}-\underline{h}$ oder zu $\underline{a}-\underline{\underline{cis}}-\underline{e}$, wie dies in modulatorischen Gängen sehr gewöhnlich ist.

Nur in solchen Fällen läßt Rameau bei konsonanten Dreiklängen einen einfachen diatonischen Fortschritt des Fundamentalbasses zu, wo man zwischen einem Dur- und Mollakkord wechselt, z. B. von $g-\underline{h}-d$ nach $\underline{a}-c-\underline{e}$, also vom G- zum $\underline{A}$-Klang, nennt dies aber doch eine Lizenz. In der Tat erklärt sich dies nach unserer Betrachtungsweise leicht, wenn wir den Mollakkord $\underline{a}-c-\underline{e}$ als C-Klang mit eingemischtem $\underline{a}$ ansehen. Dann geschieht der Übergang in enger Verwandtschaft vom G- zum C-Klang und das a erscheint nur als Dependenz des letzteren. Jeder Mollakkord repräsentiert eben in unvollkommener Weise einen doppelten Klang und kann deshalb auch in doppeltem Sinn genommen werden. Systematisch formuliert hat Rameau diese doppelte Bedeutung (double emploi) erst für den mit der Septime versehenen Mollakkord, der in der Form $\underline{d}-f-\underline{a}-c$ als $\underline{D}$-Klang, in der Form $f-\underline{a}-c-d$ als F-Klang gelten kann, oder dessen Fundamentalbaß nach Rameaus Ausdrucksweise $\underline{D}$ oder F sein kann. In diesem Septimenakkord tritt die doppelte Bedeutung stärker hervor, weil der F-Klang in ihm vollständiger ist; aber sie

kommt ebenso, wenn auch minder deutlich, dem einfachen Mollakkord zu.

Zu dem Trugschluß

$$g — \underline{h} — d \ldots . \underline{a} — c — \underline{e}$$

gesellt sich, der Kadenz in der Molltonart entsprechend, der andere

$$g — \underline{h} — d \ldots . \overline{as} — c — \overline{es},$$

wo der Akkord $\overline{as} — c — \overline{es}$ statt der normalen Lösung $c — \overline{es} — g$ eintritt. Doch wird hier von dem C-Klang nur eine einzige Note erhalten, weshalb dieser Trugschluß viel auffallender ist. Auch dieser wird gemildert, wenn man dem G-Akkord die Septime f beifügt, welche mit $\overline{as}$ verwandt ist.

Wenn zwei Akkorde nebeneinander gestellt werden, welche nur im zweiten Grade verwandt sind, wird dies im allgemeinen als ein jäher Sprung empfunden werden. Wenn aber der Akkord, welcher ihre Verbindung herstellt, ein Hauptakkord der Tonart ist und daher schon häufig gehört wurde, ist die Wirkung nicht so auffallend. So sieht man in den Schlußkadenzen nicht ganz selten die Dreiklänge $f — \underline{a} — c$ und $g — \underline{h} — d$ aufeinander folgen, welche mittels des tonischen Akkordes verwandt sind:

$$\overbrace{f — \underline{a} — c} \qquad \overbrace{g — \underline{h} — d}$$
$$\underbrace{c — \underline{e} — g}$$

Überhaupt ist bei allen diesen Regeln über die Fortschreitung festzuhalten, daß sie vielen Ausnahmen unterworfen sind, teils weil der Ausdruck fordern kann, ausnahmsweise stärkere Sprünge in der Fortschreitung zu machen, teils weil die Erinnerung an die kurz zuvor gehörten Akkorde eine schwache Verwandtschaft genügend zu unterstützen vermag, um sie deutlich fühlbar zu machen. Offenbar ist es ein falscher Standpunkt, auf den sich die Lehrer der Harmonik gestellt haben, indem sie dies und jenes in der Musik für verboten erklärten. In der Tat ist nichts in der Musik absolut verboten, und man findet von sämtlichen Regeln der Stimmführung Ausnahmen gerade in den wirkungsreichsten Sätzen der größten Komponisten. Man hätte vielmehr darauf ausgehen sollen, zu sagen, daß dieser und jener Schritt, den man verbietet, irgend welche auffallende und ungewöhnliche Wirkung auf den Hörer macht, die eben, weil sie

ungewöhnlich ist, nur hinpaßt, wo Ungewöhnliches auszudrücken ist. Im allgemeinen gehen die Vorschriften der Theoretiker darauf aus, einen leicht zu fassenden und wohl zusammenhängenden Fluß der Melodie und Harmonie zu erhalten. Verlangt man einen solchen, so tut man gut, ihre Verbote zu beachten. Aber es ist nicht zu leugnen, daß eine zu ängstliche Vermeidung des Ungewöhnlichen eine gewisse Gefahr der Trivialität und Mattherzigkeit herbeiführt, während andererseits zu rücksichtsloses und häufiges Überspringen der Regeln die Sätze barock und zusammenhanglos erscheinen läßt.

Wo unzusammenhängende Dreiklänge nebeneinander treten, ist ihre Umbildung in Septimenakkorde häufig vorteilhaft, um eine bessere Verbindung herzustellen. Statt der zuletzt erwähnten Folge der Dreiklänge von indirekter Verwandtschaft:

$$f — \underline{a} — c \quad \text{und} \quad g — \underline{h} — d$$

kann man die Septimenakkorde aufeinander folgen lassen, welche dieselben Klänge repräsentieren:

$$f — \underline{a} — c — d \quad \text{und} \quad g — \underline{h} — d — f.$$

Dann bleiben zwei Töne von den vieren unverändert; in dem *F*-Akkord klingt noch das *d* der Oberdominantseite an, in dem *G*-Akkord das *f*.

In dieser Weise spielen die Septimenakkorde eine wichtige Rolle in der modernen Musik, um wohlverbundene und doch schnelle Fortschreitungen in den Akkorden möglich zu machen, deren forttreibende Kraft durch die Wirkung der Dissonanz noch gesteigert wird. Namentlich die Fortschreitungen nach der Unterdominantseite lassen sich leicht so ausführen.

So können wir z. B., von dem Dreiklang $g — \underline{h} — d$ ausgehend, nicht bloß zum *C*-Akkord $c — \underline{e} — g$, sondern, indem wir das g als Septime liegen lassen, gleich zum Septimenakkord $\underline{a} — c — \underline{e} — g$ übergehen, der die beiden Dreiklänge $c — \underline{e} — g$ und $\underline{a} — c — \underline{e}$ vereinigt, und können dann sogleich zu dem Verwandten des letzteren Akkordes, zu $\underline{d} — f — \underline{a}$, fortschreiten, so daß wir mit dem zweiten Schritt an die andere äußerste Grenze des übergreifenden *C*-Dursystemes gelangen. Diese Fortschreitung gibt zugleich die beste Art der Bewegung für die Septime, indem die Septime (g des Beispieles) schon dem vorausgehenden Akkord angehört, also vorbereitet eingeführt wird, und absteigend (nach f) sich auflösen kann. Versuchten wir

dieselbe Bewegung rückwärts auszuführen, so müßten wir die Septime *g* aus dem *a* des Akkordes *d*—*f*—*a* eintreten lassen, wären dann aber gezwungen, das *c* des Septimenakkordes springend einzuführen, weil wir eine verbotene Quintenparallele (*d*—*a* und *c*—*g*) erhalten würden, wollten wir es aus *d* absteigen lassen. Wir müssen es vielmehr aus dem *f* springend eintreten lassen, da das *a* des ersten Dreiklanges schon das *a* und das *g* des Septimenakkordes liefern muß. So erhalten wir also keine leicht fließende und natürliche Fortschreitung nach der Oberdominantseite hin; die Bewegung ist viel mehr gehindert, als wenn wir nach der Unterdominantseite fortschreiten. Demgemäß ist denn auch die regelmäßige und gewöhnliche Fortschreitung der Septimenakkorde die mit fallender Septime nach dem Dreiklang, dessen Quinte gleich dem Grundton des Septimenakkordes ist. Wir können, wenn wir den Grundton des Septimenakkordes mit I bezeichnen, seine Terz mit III usw., mit absteigender Septime folgende beiden Dreiklänge erreichen:

I—III—V—VII und I—III—V—VII
| ╲ ╱ ╱ | | ╲ ╱
I— IV—VI I—III— VI.

Von diesen beiden Fortschreitungen ist die erstere in den Dreiklang, dessen Grundton IV ist, die lebhaftere, insofern sie zu einem Akkord mit zwei neuen Tönen führt. Die andere dagegen, zum Dreiklang des Grundtones VI, führt nur einen neuen Ton ein. Die erstere wird deshalb als die hauptsächlichste Auflösung der Septimenakkorde betrachtet, z. B.

g—*h*—*d*—*f* *e*—*g*—*h*—*d*
| ╲ ╱ ╱ | ╲ ╱ ╱
g——*c*—*e* *e*——*a*— *c*

c—*e*—*g*—*h* *h*—*d*—*f*—*a*
| ╲ ╱ ╱ | ╲ ╱ ╱
c——*f*—*a* *h*——*e*—*g*.

Durch das Absteigen des Tones VII wird der Ton VI eingeführt. Dieser ist im ersteren Falle Terz des neu eintretenden Dreiklanges, im zweiten Falle Grundton. Er kann auch Quinte sein. Das gibt die Fortschreitung:

I—III—V—VII
╲ ╲ ╱ ╱
II—IV—VI,

welche aber nur in den beiden Akkorden

$$\underline{h} - d - f - \underline{a} \quad \text{und} \quad \underline{h} - d - f - \overline{as}$$
$$c - \underline{e} - g \qquad\qquad c - \overline{es} - g$$

natürlich ist, weil die beiden Septimenakkorde den G-Klang vertreten, und der tonische Akkord das Band der Verwandtschaft zwischen ihren beiden Hälften herstellt. In den anderen Fällen gibt unser Schema sogenannte Trugfortschreitungen

$$g - \underline{h} - d - f \quad \text{oder} \quad g - \underline{h} - d - f$$
$$\underline{a} - c - \underline{e} \qquad\qquad \overline{as} - c - \overline{es},$$

welche dadurch gerechtfertigt sind (namentlich die erstere als die natürlichere), daß das $c - \underline{e}$ oder $c - \overline{es}$ des Auflösungsakkordes der normalen Auflösung angehören. Rameau bemerkt deshalb richtig, daß diese Art der Auflösung nur erlaubt ist, wenn die IV des zweiten Akkordes die normale Quarte der I im Septimenakkord ist.

Damit sind die Lösungen mit absteigender Septime erschöpft. Die mit liegenbleibender geschehen nach folgenden Schemata:

$$\begin{array}{llll} \text{I}\text{—}\text{III}\text{—}\text{V}\text{—}\text{VII} & & \text{und} & \text{I}\text{—}\text{III}\text{—}\text{V}\text{—}\text{VII} \\ \diagdown\ \diagdown & & & \diagdown \\ \text{II}\ \ \text{IV} & \text{VII} & & \text{II}\text{——}\text{V}\text{—}\text{VII}. \end{array}$$

Im ersten wird die Septime Grundton, im zweiten Terz des neuen Akkordes. Wenn sie Quinte würde, fiele der neue Akkord ganz mit einem Teil des Septimenakkordes zusammen:

$$\text{I} - \text{III} - \text{V} - \text{VII}$$
$$\text{VII} - \text{III} - \text{V} - \text{VII}.$$

In diesen Verbindungen geschieht die Auflösung nach der Oberdominantseite hin. Der Fortschritt ist am entschiedensten in der ersten von ihnen, wo die Septime Grundton wird. Diese Auflösungen sind im ganzen ungewöhnlicher, weil man leichter und häufiger schon von Akkorden der Oberdominantseite her in die Septimenakkorde des unverwendeten Systemes einrückt. Bei denen des verwendeten Systemes kommen diese Fortschritte häufiger vor, weil deren Septimen auch aufsteigend eintreten können, und daher die Quintenfolgen wegfallen, welche den Übergang von einem Dreiklang zu einem an seiner Oberdominantseite liegenden Septimenakkord erschweren.

Was endlich die Übergänge von einem Septimenakkord zu einem anderen, oder zu einem dissonanten Dreiklang des verwendeten Systemes betrifft, welchen man als einen abgekürzten Septimenakkord betrachten kann, so sind diese Sachen in den Lehrbüchern des

Generalbasses genügend entwickelt und bieten keine prinzipiellen Schwierigkeiten dar, wegen deren wir bei ihnen verweilen müßten.

Dagegen haben wir noch einige Regeln zu besprechen, welche sich auf die Bewegung der einzelnen Stimmen in polyphonen Sätzen beziehen. Ursprünglich waren in solchen polyphonen Sätzen, wie wir oben auseinander gesetzt haben, alle Stimmen von gleicher Berechtigung, hatten auch gewöhnlich nacheinander dieselben melodischen Figuren zu wiederholen. Die Harmonie war Nebensache, die melodische Bewegung der vereinzelten Stimmen Hauptsache. Es mußte deshalb dafür gesorgt werden, daß jede Stimme jeder anderen gegenüber selbständig und deutlich von ihr getrennt blieb. Das Verhältnis zwischen der Bedeutung der Harmonie und Melodie ist zwar in der neueren Musik wesentlich verändert worden; erstere hat eine viel höhere selbständige Bedeutung erhalten. Aber die rechte Vollendung erhält sie doch immer erst, wenn sie aus dem Zusammenklang mehrerer Stimmen entsteht, die auch jede für sich ihre schöne und klare melodische Fortschreitung haben, und deren Fortschreitung dem Hörer leicht verständlich bleibt.

Darauf beruht nun das Verbot der sogenannten Oktaven- und Quintenparallelen. Über den Sinn dieser Verbote ist viel gestritten worden. Der Sinn des Oktavenverbotes hat sich durch die musikalische Praxis selbst klar gemacht. Man verbietet in polyphoner Musik zwei Stimmen, welche um eine oder zwei Oktaven voneinander entfernt sind, so fortschreiten zu lassen, daß ihre Distanz beim nächsten Schritt dieselbe ist. Aber ebenso verbietet es sich, in einem mehrstimmigen Satze zwei Stimmen durch einige Noten im Einklang fortgehen zu lassen, dagegen nicht für ganze musikalische Absätze zwei Stimmen, oder auch alle Stimmen in Einklängen und Oktaven zu vereinigen, um einen melodischen Gang kräftiger herauszuheben. Offenbar ist der Grund dieser Regel nur darin zu suchen, daß der Reichtum der Stimmführung durch die Einklänge und Oktaven beschränkt wird. Das darf geschehen, wo es mit offener Absicht für eine melodische Phrase ausgeführt wird, aber nicht im Laufe des Stückes für einige wenige Noten, wo es nur den Eindruck machen kann, als ob ein ungeschickter Zufall den Reichtum der Stimmführung beeinträchtigt. Die Begleitung einer unteren Stimme in der höheren Oktave verstärkt eben nur einen Teil des Klanges der unteren Stimme

und ist also, wo es auf die Mannigfaltigkeit der Stimmführung ankommt, von dem Einklang nicht wesentlich verschieden.

Nun steht in dieser Beziehung der Oktave die Duodezime am nächsten und deren untere Oktave die Quinte. An demselben Fehler der Oktavenparallelen nehmen daher auch die Duodezimenparallelen und Quintenparallelen Teil. Aber bei ihnen steht es noch schlimmer. Während man nämlich die Begleitung in Oktaven, wo sie dem Zweck entspricht, durch eine ganze Melodie fortführen kann, ohne einen Fehler zu begehen, kann man dies für die Quinten und Duodezimen nicht durchführen, ohne die Tonart zu verlassen. Man kann nämlich von der Tonika als Grundton mit Quintenbegleitung keinen einfachen Schritt machen, ohne die Tonart zu verlassen. In *C*-Dur würde man von der Quinte $c - g$ nach aufwärts auf $d - a$ kommen; der Tonleiter gehört aber nicht a, sondern das tiefere $\underline{a}$ an. Abwärts folgt $\underline{h} - \overline{fis}$. Der Ton $\overline{fis}$ fehlt der Leiter ganz. Die übrigen Schritte von $\overline{d}$ aufwärts bis $\underline{a}$ kann man allerdings in reinen Quinten innerhalb der Tonart ausführen. Es läßt sich also die klangverstärkende Begleitung in der Duodezime nicht konsequent durchführen. Andererseits aber erscheinen doch beide Intervalle, namentlich wenn sie um einige gleiche Schritte melodisch fortgehen, leicht nur als Klangverstärkung des Grundtones. Bei der Duodezime liegt dies darin, daß sie einem der Obertöne des Grundtones direkt entspricht. Bei der Quinte $c - g$ erscheinen c und g als die beiden ersten Obertöne des Kombinationstones C, der die Quinte begleitet. Die Quintenbegleitung teilt also, wo sie vereinzelt innerhalb eines mehrstimmigen Satzes vorkommt, den Vorwurf der Eintönigkeit, und kann auch nicht konsequent als Begleitung gebraucht werden, ist also in allen Fällen zu vermeiden.

Daß übrigens die Quintenfolgen eben nur den Gesetzen der künstlerischen Komposition widersprechen und nicht dem natürlichen Ohr übelklingend sind, geht einfach aus dem Faktum hervor, daß alle Töne unserer Stimme und der meisten Instrumente von Duodezimen begleitet sind, auf welcher Begleitung der ganze Bau unseres Tonsystemes beruht. Sobald also die Quinten als mechanisch dem Klang zugehörige Bestandteile erscheinen, haben sie ihre volle Berechtigung. So in den Mixturen der Orgel. In diesen Registern werden mit den Pfeifen, welche den Grundton des Klanges geben,

auch immer andere angeblasen, welche die harmonischen Obertöne dieses Grundtones, Oktaven, Duodezimen in mehrfacher Wiederholung, auch wohl hohe Terzen geben. Man setzt, wie schon früher erwähnt wurde, auf diese Weise künstlich einen schärferen einschneidenderen Klang zusammen, als ihn die einfachen Orgelpfeifen mit ihren verhältnismäßig schwachen Obertönen geben. Nur durch dieses Mittel wird der Klang der Orgel ausreichend, den Gesang einer größeren Gemeinde zu beherrschen. Fast alle musikalischen Theoretiker haben sich gegen die Begleitung mit Quinten oder gar Terzen ereifert, aber glücklicherweise gegen die Praxis des Orgelbaues nichts ausrichten können. In der Tat geben die Mixturen der Orgel keine andere Klangmasse, als Streichinstrumente oder Posaunen und Trompeten geben würden, wenn sie dieselbe Musik ausführten. Ganz anders würde es sein, wenn wir selbständige Stimmen hinstellen wollten, von denen wir dann auch eine selbständige Fortschreitung nach den Gesetzen der melodischen Bewegung, die in der Tonleiter gegeben sind, erwarten müssen. Solche selbständige Stimmen können sich nie mit der genauen Präzision eines Mechanismus bewegen, sie werden durch kleine Fehler ihre Selbständigkeit immer bald wieder verraten, und dann werden wir sie dem Gesetz der Tonleiter unterwerfen müssen, welches eine konsequente Quintenbegleitung unmöglich macht.

Das Verbot der Quinten und Oktaven erstreckt sich, aber mit minderer Strenge, auch auf die nächstfolgenden konsonanten Intervalle, namentlich wenn zwei derselben so zusammengestellt werden, daß sie eine zusammenhängende Gruppe aus den Obertönen eines Klanges bilden. So sind Folgen, wie

$$d — g — \underline{h}$$
$$c — f — \underline{a}$$

nach der Feststellung der musikalischen Theoretiker weniger gut, als

$$\underline{h} — d' — g'$$
$$\underline{a} — c' — f'.$$

Es ist nämlich $a — g — \underline{h}$ der dritte, vierte, fünfte Oberton des Klanges G_{-1}, dagegen können $\underline{h} — d' — g'$ nur als der fünfte, sechste, achte angesehen werden. Es wird also die Eintönigkeit bei der ersten Akkordfolge viel entschiedener ausgesprochen sein, als bei der

letzteren, welche man oft in langen Gängen fortgehen läßt, wobei sie denn freilich auch in verschiedenen Arten von Terzen und Quarten wechselt.

Das Quintenverbot war vielleicht in der Geschichte der Musik eine Reaktion gegen die unvollkommenen ersten Versuche des mehrstimmigen Gesanges, der sich auf eine Begleitung in Quarten oder Quinten beschränkte; dann wurde es, wie jede Reaktion, in einer unproduktiven mechanischen Zeit übertrieben, und die Reinheit von Quintenparallelen wurde zu einem Hauptkennzeichen einer guten Komposition gemacht. Die neueren Harmoniker stimmen darin überein, daß man andere Schönheiten der Stimmführung nicht zerstören solle, weil Quintenparallelen darin vorkommen, wenn es auch rätlich ist, sie zu vermeiden, soweit man nichts anderes zu opfern braucht.

Das Verbot der Quinten hat übrigens noch eine andere Beziehung, auf welche Hauptmann aufmerksam gemacht hat. Man kommt nämlich nicht leicht in Versuchung, Quintenfolgen zu machen, wenn man von einem konsonanten Dreiklang zu einem nahe verwandten übergeht, weil sich da näherliegende andere Fortschritte der Stimmen bieten. So z. B. schreitet man vom *C*-Durdreiklang nach den vier verwandten Dreiklängen folgendermaßen, indem der Fundamentalbaß um Terzen oder Quinten fortschreitet:

$c - \underline{e} - g$	$c - \underline{e} - g$
$c - \underline{e} - \underline{a}$	$c - f - \underline{a}$
$c - \underline{e} - g$	$c - \underline{e} - g$
$\underline{H} - \underline{e} - g$	$\underline{H} - d - g$

Wenn man aber den Fundamentalbaß in Sekunden fortschreiten läßt, also zu einem nicht mehr unmittelbar verwandten Akkord fortgeht, ist allerdings die nächste Lage des neuen Akkordes eine solche, die eine Quintenfolge herbeiführt. Z. B.:

$g - \underline{h} - d'$ oder $g - \underline{h} - d'$
$\underline{a} - c' - \underline{e'}$ oder $f - \underline{a} - c'$.

In diesen Fällen muß man also schon andere Fortschrittsweisen mit größeren Schritten suchen, wie:

$g - \underline{h} - d'$ oder $g - \underline{h} - d'$
$\underline{e} - \underline{a} - c'$ oder $\underline{a} - c' - f'$,

wenn man die Quinten vermeiden will.

Bei den durch nahe Verwandtschaft und geringsten Abstand in der Tonleiter eng verbundenen Akkorden fallen also die Quintenparallelen von selbst aus, sie sind, wo sie vorkommen, immer ein Zeichen jäher Akkordübergänge; und wenn man wirklich solche macht, ist es besser, die Fortschreitung der Stimmen derjenigen ähnlicher zu machen, welche im Übergang zu verwandten Akkorden von selbst entsteht.

Dieses von Hauptmann hervorgehobene Moment bei den Quintenfolgen erscheint allerdings geeignet, dem Gesetz noch einen weiteren Nachdruck zu leihen. Daß es nicht das einzige Motiv für das Quintenverbot ist, zeigt sich darin, daß die verbotene Folge

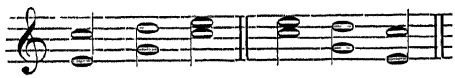
$$g — \underline{h} — d' \ldots . f — \underline{a} — c'$$

erlaubt wird, wenn sie in der Akkordlage

$$\underline{h} — d' — g' \ldots . \underline{a} — c' — f'$$

geschieht, wobei der Sprung im Fundamentalbaß derselbe bleibt.

Man hat hieran das Verbot der sogenannten verdeckten Quinten und Oktaven wenigstens für die äußeren Stimmen eines mehrstimmigen Satzes geschlossen. Das Verbot sagt aus, daß die unterste und oberste Stimme eines Satzes nicht in gleichgerichteter Bewegung in die Konsonanz einer Oktave oder Quinte (Duodezime) übergehen sollen. Sie sollen vielmehr in eine solche Konsonanz nur in Gegenbewegung treten, die eine sinkend, die andere steigend. Dasselbe würde im zweistimmigen Satz für den Einklang gelten. Der Sinn dieses Gesetzes ist wohl nur der, daß jedesmal, wo die äußeren Stimmen sich in die Töne eines Klanges zusammenschließen, sie einen relativen Ruhezustand gegeneinander erreichen. Wo dies der Fall ist, erhält die Bewegung allerdings besseres Gleichgewicht, wenn die die ganze Tonmasse umschließenden Stimmen von entgegengesetzten Seiten ihrem Zusammenschluß sich nähern, als wenn der Schwerpunkt der Tonmasse durch gleichsinnige Bewegung der äußeren Stimmen verrückt wird, und diese, in verschiedener Geschwindigkeit fortschreitend, sich einholen. Wo aber die Bewegung in gleichem Sinn weiter geht, und kein Ruhepunkt beabsichtigt ist, werden auch die verdeckten Quinten nicht vermieden, wie in der gewöhnlichen Formel:



worin das *GD* durch verdeckte Quintengänge erreicht wird.

Eine andere Regel der Stimmführung, betreffend den sogenannten unharmonischen Querstand, ergab sich wohl zunächst aus dem Bedürfnis der Sänger. Was aber für den Sänger schwer zu treffen ist, muß natürlich auch dem Hörer immer als ein ungewöhnlicher und gezwungener Schritt erscheinen. Unter Querstand versteht man den Fall, wo zwei Töne zweier aufeinander folgenden Akkorde, die verschiedenen Stimmen angehören, falsche Oktaven oder Quinten bilden: also wenn im ersten Akkord eine Stimme ein *h* hat, eine andere im zweiten ein *b*, oder die erste ein *c*, die andere ein *cis*. Der Quintenquerstand ist nur für die äußeren Stimmen verboten; er tritt z. B. ein, wenn im ersten Akkord der Baß ein *h*, im zweiten der Sopran ein *f* hat, oder umgekehrt; *hf* ist eine falsche Quinte. Der Sinn der Regel für die falschen Oktaven ist wohl der, daß es dem Sänger schwer wird, den neuen Ton zu treffen, der aus der Tonleiter heraustritt, wenn er vorher von einer anderen Stimme den in der Leiter liegenden nächsten Ton ausführen hört. Ähnlich wenn er zur falschen Quinte eines in der gegenwärtigen Harmonie als oberster oder unterster stark heraustretenden Tones übergehen soll. Es liegt also ein gewisser Sinn in der Sache, aber Ausnahmen kommen genug vor, da das Ohr der neueren Musiker, Sänger und Hörer sich an kühnere Kombinationen und lebhaftere Bewegung gewöhnt hat. Alle diese Regeln beziehen sich wesentlich auf solche Musik, welche, wie die alte Kirchenmusik, in einem möglichst ruhigen, sanften und überall gut vermittelten, ohne absichtliche Kraftanstrengung im ebenmäßigsten Gleichgewicht fortlaufenden Fluß dahingleiten soll. Wo die Musik heftigere Anstrengung und Aufregung ausdrücken soll, verlieren diese Regeln ihren Sinn. Auch findet man sowohl verdeckte Quinten und Oktaven, als auch Querstände von falschen Quinten in Menge selbst bei dem als Harmoniker sonst so strengen Sebastian Bach in seinen Chorälen, in denen die Bewegung der Stimmung aber auch freilich viel kräftiger ausgedrückt ist, als in der alten italienischen Kirchenmusik.

Neunzehnter Abschnitt.

Beziehungen zur Ästhetik.

Blicken wir zurück auf die gewonnenen Ergebnisse.

Eine gewisse Klasse von Klängen wird von uns bei aller Musik, melodischer sowohl als harmonischer, bevorzugt, und bei feinerer, künstlerischer Ausbildung der Musik sogar so gut wie ausschließlich angewendet; das sind die Klänge mit harmonischen Obertönen, d. h. die Klänge, deren höhere Partialtöne Schwingungszahlen haben, welche ganze Multipla sind von der Schwingungszahl des tiefsten Partialtones des Klanges, des Grundtones. Für eine gute musikalische Wirkung verlangen wir eine gewisse mäßige Stärke der fünf bis sechs untersten Partialtöne, geringe Stärke der höheren Partialtöne.

Objektiv ausgezeichnet ist diese Klasse von Klängen mit harmonischen Obertönen dadurch, daß zu ihr alle durch einen gleichmäßig fortgehenden mechanischen Vorgang erzeugten Schallbewegungen gehören, die demgemäß auch eine gleichmäßig fortdauernde Empfindung erregen; unter ihnen stehen in erster Reihe die Klänge der menschlichen Stimme, des der Zeit und der Wichtigkeit nach ersten Musikwerkzeuges des Menschen. Die Klänge aller Blasinstrumente und Streichinstrumente gehören in dieselbe Klasse.

Unter den Körpern, die durch Anschlag zum Tönen gebracht werden, haben einige, wie die Saiten, ebenfalls harmonische Obertöne, und diese sind zur künstlerischen Musik verwendbar.

Die Mehrzahl der übrigen, Membranen, Stäbe, Platten usw., haben unharmonische Nebentöne, und nur diejenigen von ihnen, welche nicht stark hervortretende Nebentöne dieser Art haben, können vereinzelt und gelegentlich neben eigentlich musikalischen Instrumenten verwendet werden.

Die durch Schlag erregten tönenden Körper können zwar eine Zeitlang fortklingen, aber sie geben nicht einen in gleichmäßiger Stärke

anhaltenden, sondern einen bald langsamer, bald schneller abnehmenden und verlöschenden Ton. Die zum ausdrucksvollen Vortrag nötige fortdauernde Beherrschung der Tonstärke ist also nur bei den Instrumenten erster Art möglich, welche dauernd erregt werden und nur harmonische Obertöne geben können. Dagegen haben allerdings die durch Schlag erregten tönenden Körper einen eigentümlichen Wert durch die schärfere Bezeichnung des Rhythmus.

Ein zweiter Grund für die Bevorzugung der Klänge mit harmonischen Obertönen ist subjektiv und in der Einrichtung unseres Ohres bedingt. In demselben erregt nämlich auch jeder einfache Ton, wenn er stark genug ist, schwächere Empfindungen harmonischer Obertöne, und jede Kombination von mehreren einfachen Klängen Kombinationstöne, wie ich am Ende des siebenten Abschnittes auseinander gesetzt habe. Sowie nun auch nur einzelne Klänge mit irrationalen Partialtönen hinreichend stark angegeben werden, erhalten wir deshalb Dissonanzen, während einfache Töne im Ohr selbst etwas von der Natur der zusammengesetzten mit harmonischen Obertönen erhalten.

Historisch, dürfen wir wohl annehmen, hat sich alle Musik vom Gesang aus entwickelt; später lernte man die durch den Gesang erreichbaren melodischen Wirkungen auch durch andere Instrumente, welche in ihrer Klangfarbe den Tönen der menschlichen Stimme ähnlich zusammengesetzt waren, hervorbringen. Daß schließlich, auch bei den größten Fortschritten der Technik, die Auswahl der Tonwerkzeuge auf die, welche Klänge mit harmonischen Obertönen geben, beschränkt bleiben mußte, erklärt sich aus den angegebenen Verhältnissen.

Aber diese durchaus festgehaltene besondere Auswahl der Tonwerkzeuge läßt uns auch sicher erkennen, daß die harmonischen Obertöne von jeher in den musikalischen Bildungen eine wesentliche Rolle gespielt haben, und zwar nicht bloß für die Harmonie, wie uns die zweite Abteilung unseres Buches gelehrt hat, sondern auch in der Melodiebildung.

Andererseits können wir uns auch jetzt noch jeden Augenblick von der wesentlichen Bedeutung, welche die Obertöne in der Melodie spielen, überzeugen durch die Ausdruckslosigkeit solcher Melodien, die in objektiv einfachen Tönen, z. B. mit gedackten Orgelpfeifen,

vorgetragen werden, bei denen nur subjektiv im Ohr harmonische Obertöne von geringer Intensität mittönen.

Es bestand in aller Musik von jeher das Bedürfnis, in bestimmt abgegrenzten Tonstufen fortzuschreiten; die Wahl dieser Tonstufen selbst hat lange geschwankt. Um engere Tonstufen sicher zu intonieren und zu unterscheiden, gehört eine feinere Ausbildung der Technik und des musikalischen Gehörs, als für größere Intervalle. Demgemäß finden wir, daß fast alle unzivilisierteren Völker die Halbtöne vermeiden und nur größere Intervalle zulassen. Bei einzelnen kultivierteren, Chinesen, Gälen, hat sich eine solche Skala im nationalen Geschmack befestigt.

Es hätte vielleicht scheinen können, als wenn die einfachste Art der Feststellung solcher Stufen die gewesen wäre, daß man sie alle gleich groß, d. h. gleich gut unterscheidbar in der Empfindung gemacht hätte. Eine solche Art der Abstufung ist in allen unseren Sinnesempfindungen möglich, wie Fechner in seinen Untersuchungen über das psychophysische Gesetz gezeigt hat. Wir finden sie in der Zeitteilung des musikalischen Rhythmus gebraucht, die Astronomen brauchen sie in bezug auf Lichtintensität bei der Bestimmung der Sterngrößen. Ja auch im Gebiet der Tonhöhen stellt die moderne gleichschwebende chromatische Skala des Klaviers eine ähnliche Abstufung dar. Aber obgleich man in gewissen ungebräuchlicheren Skalen der griechischen und in der modernen orientalischen Musik Fälle findet, daß einzelne engere Intervalle nach dem Prinzip der gleich großen Stufen geteilt sind, so scheint doch nie und nirgends eine Musik bestanden zu haben, deren Melodien sich fortdauernd in gleich großen Tonstufen bewegten, sondern immer sind in den Tonleitern größere und kleinere Intervalle in einer Weise gemischt worden, die, wenn man das Prinzip der Klangverwandtschaft nicht berücksichtigte, vollkommen willkürlich und unregelmäßig erscheinen muß.

Vielmehr hat sich in allen bekannten Musiksystemen von jeher das Intervall der Oktave und der Quinte mit entscheidendem Gewicht geltend gemacht. Ihre Differenz ist die Quarte, deren Differenz von der Quinte ist der pythagoreische Ganzton 8 : 9, durch welchen die Oktave zwar mit annähernder Genauigkeit, aber nicht die Quarte und nicht die Quinte geteilt werden kann.

Der einzige Rest, welcher von dem zuweilen in den Skalen der einstimmigen Musik hervortretenden Streben, Stufen nach der Gleichheit der Größe und nicht nach der Klangverwandtschaft zu bilden, in der neueren Musik geblieben ist, scheint mir in den chromatischen Vorhaltsnoten zu liegen und in dem Leitton der Tonart, wenn er jenen ähnlich gebraucht wird. Aber es ist hier doch immer nur ein aus der Reihe der klangverwandten Töne her wohlbekanntes Intervall, der Halbton, welches seiner Kleinheit wegen leicht nach der Empfindung seiner Unterscheidbarkeit abgemessen werden kann, auch an Stellen, wo seine Klangverwandtschaften im Augenblick nicht fühlbar sind.

Die entscheidende Bedeutung, welche Oktave und Quinte von jeher in allen musikalischen Skalen gehabt haben, zeigt, daß von Anfang an ein anderes Prinzip die Bildung der Tonleiter beeinflußte, bis dasselbe endlich allein die künstlerisch vollendete Form der Leiter bestimmt hat. Wir haben dies Prinzip als das der Klangverwandtschaft bezeichnet.

Die Verwandtschaft ersten Grades zwischen zwei Klängen beruht darauf, daß sie zwei gleiche Partialtöne haben.

Beim menschlichen Gesang mußte die Ähnlichkeit zweier Klänge, die im Verhältnis der Oktave oder Quinte zueinander stehen, schon früh auffallen; dadurch ist, wie bemerkt, das Intervall der Quarte mit gegeben, welches übrigens auch noch hinreichend deutlich wahrnehmbare natürliche Verwandtschaft hat, um sich selbst geltend zu machen. Um die Klangähnlichkeit der großen Terz und großen Sexte zu finden, war schon feinere Ausbildung des musikalischen Gehörs, vielleicht auch besondere Schönheit der Stimmen nötig. Auch jetzt noch lassen wir uns durch die etwas zu großen Terzen der gleichschwebenden Temperatur, an die wir gewöhnt sind, leicht dahin bestimmen, uns mit etwas zu großen Terzen zufriedengestellt zu finden, wenn wir sie nur in melodischer Folge und nicht im Zusammenklang hören. Andererseits dürfen wir nicht vergessen, daß schon in den Vorschriften des Archytas und des Abdul Kadir, beide nur auf einstimmige Musik bezüglich, die natürliche Terz bevorzugt worden ist, trotzdem beide Musiker durch deren Einführung gezwungen waren, das theoretisch so konsequente, einfache und mit der höchsten Autorität bekleidete musikalische System des Pythagoras zu verlassen.

Es hat das Prinzip der Klangverwandtschaft also nicht zu allen Zeiten die Bildung der Tonleiter ausschließlich bestimmt, und bestimmt sie auch jetzt noch nicht ausschließlich bei allen Nationen. Es ist eben dieses Prinzip als ein bis zu einem gewissen Grade frei gewähltes Stilprinzip zu betrachten, wie ich es im dreizehnten Abschnitt schon darzustellen versucht habe. Andererseits aber hat sich die Geschichte der musikalischen Technik Europas aus diesem Prinzip heraus entfaltet, und darin liegt der Hauptbeweis dafür, daß jenes Prinzip wirklich die Bedeutung hat, die wir ihm zuschreiben. Indem die diatonische Skala sich als die bevorzugte, zuletzt als die ausschließliche geltend machte, wurde zuerst in der Tonleiter das genannte Prinzip rein durchgeführt. Innerhalb der diatonischen Leiter waren nun noch zunächst verschiedene Formen der Durchführung möglich, welche die alten, im einstimmigen Gesang vollkommen gleichberechtigt nebeneinander stehenden Modi ergaben.

Viel eindringlicher aber, als in seiner melodischen Form, machte sich das Prinzip der Klangverwandtschaft geltend in seiner harmonischen Form. In der melodischen Folge läßt sich die Gleichheit zweier Partialtöne nur mit Hilfe der Erinnerung erkennen, im Zusammenklang ist es der unmittelbare sinnliche Eindruck der Schwebungen oder der gleichmäßig dahin fließenden Konsonanz, der sich dem Hörer aufdrängt. Die Lebhaftigkeit des melodischen und harmonischen Eindruckes ist unterschieden, wie die eines Erinnerungsbildes von dem gegenwärtigen sinnlichen Eindruck seines Originals. Daher rührt denn auch zunächst die viel größere Empfindlichkeit für die Reinheit der Intervalle, die bei den harmonischen Zusammenklängen sich zeigt, und welche zu den feinsten physikalischen Messungsmethoden ausgebildet werden konnte.

Demnächst kommt namentlich in Betracht, daß die Verwandtschaften zweiten Grades in der harmonischen Musik durch passende Wahl des Grundbasses auf hörbare Verwandtschaften ersten Grades zurückgeführt werden, daß überhaupt entfernte Verwandtschaften leicht deutlich hörbar gemacht werden können und somit bei viel größerer Mannigfaltigkeit der Fortschreitungen doch ein viel klarerer Zusammenhang aller einzelnen mit dem Ausgangspunkt, der Tonika, festgehalten und dem Hörer sinnlich fühlbar gemacht werden kann. Unverkennbar beruht wesentlich darauf die große Breite und der

Reichtum in Schattierungen des Ausdruckes, welche den neueren Kompositionen gegeben werden konnten, ohne daß diese den künstlerischen Zusammenhang verloren.

Wir haben dann gesehen, wie die Bedürfnisse der harmonischen Musik in eigentümlicher Weise auf die Bildung der Tonleitern zurückgewirkt haben, wie eigentlich von den alten Tongeschlechtern nur eines, unser Durgeschlecht, unverändert stehen bleiben konnte, und wie die übrigen eigentümlich verändert in unser Mollgeschlecht zusammenflossen, welches am ähnlichsten dem alten Terzengeschlecht, sich bald dem Sextengeschlecht, bald dem Septimengeschlecht nähern kann, keinem von diesen aber vollständig entspricht.

Dieser Entwickelungsprozeß der Elemente des modernen Musiksystemes hat sich bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts hingezogen. Erst als man regelmäßig Stücke, die in einer Molltonart geschrieben waren, mit dem Mollakkord zu schließen wagte, konnte man sagen, daß das musikalische Gefühl der europäischen Musiker und Hörer sich in das neue System vollständig und sicher eingewöhnt hatte. Der Mollakkord wurde als ein wenn auch getrübter Akkord seiner Tonika zugelassen.

Ob in dieser Zulassung des Mollakkordes sich etwa das Gefühl für eine andere Art einheitlicher Beziehungen seiner drei Töne ausspricht, wie es A. v. Oettingen[1]) annimmt (eine Ansicht, welche

[1]) Das Harmoniesystem in dualer Entwickelung. Dorpat und Leipzig 1866. Herr v. Oettingen betrachtet, wie schon auf S. 498 bemerkt ist, den Mollakkord als die harmonischen Untertöne seiner Quint darstellend und dadurch einen Teil ihres Klanges vertretend. Er nennt ihn den „phonischen" Akkord, im Gegensatz zu dem die Obertöne des Grundtones vertretenden „tonischen" Durakkord. Durch die Verwandtschaften der harmonischen Untertöne leitet er dann die Bildung des Mollsystemes in ganz analoger Weise ab, wie ich es durch die Verwandtschaften der Obertöne für das Dursystem getan habe. Das so konstruierte Tongeschlecht ist aber nach unserer Bezeichnung das Sextengeschlecht, und das gebräuchliche Moll ein gemischtes Geschlecht. Neuerdings (1877) hat sich ihm Herr Dr. Hugo Riemann angeschlossen, dessen eben erschienene „musikalische Syntaxis" den Versuch macht, die Konsequenzen dieses Systemes an Beispielen aus den Werken anerkannter Komponisten zu prüfen und zu bewähren. Die Anwendung dieser kritischen Methode scheint mir sehr empfehlenswert und die unumgängliche Bedingung zu sein, um in den Prinzipien der Kompositionslehre Fortschritte zu machen. Übrigens rechtfertigt der Autor (S. 54) meine im Text aufgestellte Behauptung durch den Satz: „Für die Durchführung reiner (d. h. Oettingenscher) Mollharmonik auch in der einfachsten Weise kann ich leider aus unserer gesamten Musikliteratur auch nicht ein Beispiel

darauf beruht, daß die drei Töne $c - \overline{es} - g$ den gemeinsamen Oberton g'' haben), wird erst die Zukunft lehren können, wenn es sich zeigen sollte, daß in Oettingens phonischem System (so nennt er das von ihm theoretisch entwickelte Mollsystem, welches aber von dem historischen Mollsystem wesentlich verschieden ist) breite und wohlzusammenhängende Kompositionen gebildet werden können. Historisch entwickelt hat sich das Mollsystem jedenfalls als ein Kompromiß zwischen verschiedenartigen Anforderungen. Namentlich können nur Durakkorde den Klang der Tonika rein wiedergeben; die Mollakkorde halten in ihrer Terz immer ein der Tonika und ihrer Quint nahe verwandtes, aber doch in jene sich nicht vollständig auflösendes Element fest und fügen sich daher im Schluß nicht so vollständig dem Prinzip der Tonalität, welches die bisherige Entwickelung der Musik beherrscht hat. Ich habe versucht, es wahrscheinlich zu machen, daß teils davon, teils von den abweichenden Kombinationstönen der Mollakkorde der eigentümliche ästhetische Ausdruck des Moll herrühre.

Ich habe mich bemüht, in der letzten Abteilung dieses Buches nachzuweisen, daß die Konstruktion der Tonleitern und des Harmoniegewebes ein Produkt künstlerischer Erfindung, und keineswegs durch den natürlichen Bau oder die natürliche Tätigkeit unseres Ohres unmittelbar gegeben sei, wie man es bisher wohl meist zu behaupten pflegte. Allerdings spielen die natürlichen Gesetze der Tätigkeit unseres Ohres eine große und einflußreiche Rolle dabei; sie sind gleichsam die Bausteine, welche der Kunsttrieb des Menschen benutzt hat, um das Gebäude unseres musikalischen Systemes aufzuführen; und daß man die Konstruktion des Gebäudes nur verstehen kann, wenn man die Natur der Stücke, aus denen es aufgeführt ist, genau kennen gelernt hat, zeigt gerade im vorliegenden Falle der Verlauf unserer Untersuchung sehr deutlich. Aber ebensogut, wie Leute von verschiedener Geschmacksrichtung aus denselben Steinen sehr

beibringen." Von der Richtigkeit der auf S. XIII und S. 6 angeführten Tatsache, daß die Untertöne eines stark angeschlagenen Tones eines Fortepiano bei Hebung des Dämpfers von den betreffenden Saiten nachklingen sollten, habe ich mich nicht überzeugen können. Vielleicht ist der Autor dadurch getäuscht worden, daß an stark resonierenden (namentlich wohl älteren) Instrumenten jede kräftige Erschütterung, also vielleicht auch ein kräftiger Tastenschlag, ganz unabhängig von der Tonhöhe einzelne oder mehrere von den tiefen Saiten zum Tönen bringen kann.

verschiedenartige Gebäude errichten, ebenso sehen wir auch in der Geschichte der Musik die gleichen Eigentümlichkeiten des menschlichen Ohres als Grundlage sehr verschiedener musikalischer Systeme dienen. Demgemäß meine ich, können wir nicht zweifeln, daß nicht bloß die Komposition vollendeter musikalischer Kunstwerke, sondern auch selbst die Konstruktion unseres Systemes der Tonleitern, Tonarten, Akkorde, kurz alles dessen, was in der Lehre vom Generalbaß zusammengestellt zu werden pflegt, ein Werk künstlerischer Erfindung sei, und deshalb auch den Gesetzen der künstlerischen Schönheit unterworfen sein müsse. In der Tat hat die Menschheit seit Terpander und Pythagoras nun zweieinhalb Jahrtausende an dem diatonischen System gearbeitet und geändert, und es läßt sich jetzt noch in vielen Fällen erkennen, daß gerade die ausgezeichneten Komponisten es waren, welche teils durch selbstgemachte Erfindungen, teils durch die Sanktion, welche sie fremden Erfindungen erteilten, indem sie sie künstlerisch verwendeten, die fortschreitenden Änderungen des Tonsystemes herbeigeführt haben.

Die ästhetische Zergliederung vollendeter musikalischer Kunstwerke und das Verständnis der Gründe ihrer Schönheit stößt fast überall noch auf scheinbar unüberwindliche Hindernisse. Dagegen in dem besprochenen Gebiet der elementaren musikalischen Technik haben wir nun so viel Einsicht in den Zusammenhang gewonnen, daß wir die Ergebnisse unserer Untersuchung in Beziehung bringen können zu den Ansichten, welche über den Grund und Charakter der künstlerischen Schönheit überhaupt aufgestellt und in der neueren Zeit ziemlich allgemein angenommen worden sind. Es ist in der Tat nicht schwer, eine enge Beziehung und Übereinstimmung zwischen beiden zu entdecken; ja es möchten sich wenig geeignetere Beispiele finden lassen, als die Theorie der Tonleitern und der Harmonie, um einige der dunkelsten und schwierigsten Punkte der allgemeinen Ästhetik zu erläutern. Ich glaubte deshalb, an diesen Betrachtungen nicht vorbeigehen zu dürfen, um so mehr, da sie mit der Lehre von den Sinneswahrnehmungen und dadurch auch mit der Physiologie in engem Zusammenhang stehen.

Daß die Schönheit an Gesetze und Regeln gebunden sei, die von der Natur der menschlichen Vernunft abhängen, wird wohl nicht mehr bezweifelt. Die Schwierigkeit ist nur, daß diese Gesetze und

Regeln, von deren Erfüllung die Schönheit abhängt und nach denen sie beurteilt werden muß, nicht vom bewußten Verstand gegeben sind, und auch weder dem Künstler, während er das Werk hervorbringt, noch dem Beschauer oder Hörer, während er es genießt, bewußt sind. Die Kunst handelt absichtsvoll, doch soll das Kunstwerk als ein absichtsloses erscheinen und so beurteilt werden. Sie soll schaffen, wie die Einbildungskraft vorstellt, gesetzmäßig ohne bewußtes Gesetz, zweckmäßig ohne bewußten Zweck. Ein Werk, von dem wir wissen und erkennen, daß es durch reine Verstandestätigkeit zustande gekommen ist, werden wir nie als ein Kunstwerk anerkennen, so vollkommen zweckentsprechend es auch sein mag. Wo wir in einem Kunstwerk bemerken, daß bewußte Reflexionen auf die Anordnung des Ganzen eingewirkt haben, finden wir es arm. „Man fühlt die Absicht, und man wird verstimmt." Und doch verlangen wir von jedem Kunstwerk Vernunftmäßigkeit, wie wir dadurch zeigen, daß wir es einer kritischen Betrachtung unterwerfen, daß wir unseren Genuß und unser Interesse daran zu erhöhen suchen durch Aufspürung der Zweckmäßigkeit, des Zusammenhanges und Gleichgewichtes aller seiner einzelnen Teile. Wir finden es desto reicher, je mehr es uns gelingt, uns die Harmonie und Schönheit aller Einzelheiten klar zu machen, und wir betrachten es als das Hauptkennzeichen eines großen Kunstwerkes, daß wir durch eingehendere Betrachtung immer mehr und mehr Vernunftmäßigkeit im einzelnen finden, je öfter wir es an uns vorübergehen lassen, und je mehr wir darüber nachdenken. Indem wir durch kritische Betrachtung die Schönheit eines solchen Werkes zu begreifen streben, was uns bis zu einem gewissen Grade auch gelingt, zeigen wir, daß wir eine Vernunftmäßigkeit in dem Kunstwerk voraussetzen, die auch zum bewußten Verständnis erhoben werden kann, obgleich ein solches Verständnis weder für die Erfindung, noch für das Gefühl des Schönen nötig ist. Denn in dem unmittelbaren Urteil des künstlerisch gebildeten Geschmackes wird ohne alle kritische Überlegung das ästhetisch Schöne als solches anerkannt; es wird ausgesagt, daß es gefalle oder nicht gefalle, ohne es mit irgend einem Gesetz und Begriff zu vergleichen.

Daß wir aber das Wohlgefallen am Schönen nicht als eine zufällige individuelle Beziehung auffassen, sondern als eine gesetzmäßige Übereinstimmung mit der Natur unseres Geistes, zeigt sich

eben darin, daß wir von jedem gesunden anderen menschlichen Geist dieselbe Anerkennung des Schönen erwarten und verlangen, die wir ihm selbst zollen. Höchstens geben wir zu, daß die nationalen oder individuellen Abweichungen des Geschmackes sich dem einen oder anderen künstlerischen Ideal mehr zuneigen und von ihm leichter erregt werden, so wie denn auch nicht zu leugnen ist, daß eine gewisse Erziehung und Übung in der Anschauung schöner Kunstwerke nötig sei, um in ihr tieferes Verständnis einzudringen.

Die Hauptschwierigkeit in diesem Gebiet ist nun zu begreifen, wie Gesetzmäßigkeit durch Anschauung wahrgenommen werden kann, ohne daß sie als solche zum wirklichen Bewußtsein kommt. Auch erscheint diese Bewußtlosigkeit des Gesetzmäßigen nicht als eine Nebensache in der Wirkung des Schönen auf unseren Geist, welche sein kann oder auch nicht sein kann, sondern sie ist offenbar von ganz wesentlicher und hervorragender Bedeutung. Denn indem wir überall die Spuren von Gesetzmäßigkeit, Zusammenhang und Ordnung wahrnehmen, ohne doch das Gesetz und den Plan des Ganzen vollständig übersehen zu können, entsteht in uns das Gefühl einer Vernunftmäßigkeit des Kunstwerkes, die weit über das hinausreicht, was wir für den Augenblick begreifen, und an der wir keine Grenzen und Schranken bemerken. Eingedenk des Dichterwortes:

„Du gleichst dem Geist, den Du begreifst“,

fühlen wir diejenigen Geisteskräfte, welche in dem Künstler gearbeitet haben, unserem bewußten verständigen Denken bei weitem überlegen, indem wir zugeben müssen, daß mindestens, wenn es überhaupt möglich wäre, unübersehbare Zeit, Überlegung und Arbeit dazu gehört haben würde, um durch bewußtes Denken denselben Grad von Ordnung, Zusammenhang und Gleichgewicht aller Teile und aller inneren Beziehungen zu erreichen, welchen der Künstler, allein durch sein Taktgefühl und seinen Geschmack geleitet, hergestellt hat, und welchen wir wiederum mittels unseres eigenen Taktgefühles und Geschmackes zu schätzen und zu fassen wissen, längst ehe wir angefangen haben, das Kunstwerk kritisch zu analysieren.

Es ist klar, daß wesentlich hierauf die Hochschätzung des Künstlers und des Kunstwerkes liegt. Wir verehren in dem ersteren einen Genius, einen Funken göttlicher Schöpferkraft, welcher über die Grenzen unseres verständig und selbstbewußt rechnenden Denkens

hinausgeht. Und doch ist der Künstler wieder ein Mensch wie wir, in welchem dieselben Geisteskräfte wirken, wie in uns selbst, nur in ihrer eigentümlichen Richtung reiner, geklärter, in ungestörterem Gleichgewicht, und indem wir selbst mehr oder weniger schnell und vollkommen die Sprache des Künstlers verstehen, fühlen wir, daß wir selbst teilhaben an diesen Kräften, die so Wunderbares hervorbrachten.

Darin liegt offenbar der Grund der moralischen Erhebung und des Gefühles seliger Befriedigung, welches die Versenkung in echte und hohe Kunstwerke hervorruft. Wir lernen an ihnen fühlen, daß auch in den dunklen Tiefen eines gesund und harmonisch entfalteten menschlichen Geistes, welche der Zergliederung durch das bewußte Denken für jetzt wenigstens noch unzugänglich sind, der Keim zu einer vernünftigen und reicher Entwickelung fähigen Ordnung schlummert, und wir lernen, vorläufig zwar an gleichgültigem Stoff ausgeführt, in dem Kunstwerk das Bild einer solchen Ordnung der Welt, welche durch Gesetz und Vernunft in allen ihren Teilen beherrscht wird, kennen und bewundern. Es ist wesentlich Vertrauen auf die gesunde Urnatur des menschlichen Geistes, wie sie ihm zukommt, wo er nicht geknickt, verkümmert, getrübt und verfälscht worden ist, was die Anschauung des rechten Kunstwerkes in uns erweckt.

In allen diesen Beziehungen aber ist es eine wesentliche Bedingung, daß der ganze Umfang der Gesetzmäßigkeit und Zweckmäßigkeit eines Kunstwerkes nicht durch bewußtes Verständnis gefaßt werden könne. Eben durch den Teil seiner Vernunftmäßigkeit, welcher nicht Gegenstand bewußten Verständnisses wird, behält das Kunstwerk für uns das Erhebende und Befriedigende, von ihm hängen die höchsten Wirkungen künstlerischer Schönheit ab, nicht von dem Teil, welchen wir vollständig analysieren können.

Wenden wir nun diese Betrachtungen auf das System der musikalischen Töne und der Harmonie an, so sind dies allerdings Gegenstände, die einem ganz untergeordneten und elementaren Gebiet angehören, aber auch sie sind langsam reif gewordene Erfindungen des künstlerischen Geschmackes der Musiker, und auch sie müssen sich daher den allgemeinen Regeln der künstlerischen Schönheit fügen. Gerade weil wir hier noch in dem niederen Gebiet künstlerischer Technik verweilen, und nicht mit dem Ausdruck tieferer psycho-

logischer Probleme zu tun haben, stoßen wir auf eine verhältnismäßig einfache und durchsichtige Lösung jenes fundamentalen Rätsels der Ästhetik.

Die ganze letzte Abteilung dieses Buches hat auseinander gesetzt, wie die Musiker allmählich die verwandtschaftlichen Beziehungen zwischen den Tönen und Akkorden aufgefunden haben, wie durch die Erfindung der harmonischen Musik diese Beziehungen enger, deutlicher und reicher geworden sind. Wir sind imstande gewesen, das gesamte System von Regeln, die die Lehre vom Generalbaß bilden, herzuleiten aus dem Bestreben, eine deutlich zu empfindende Verbindung in die Reihe der Töne, welche ein Musikstück bilden, hineinzubringen.

Zuerst entwickelte sich das Gefühl für die melodische Verwandtschaft aufeinander folgender Töne, und zwar anfangs für die Oktave und Quinte, später für die Terz. Wir haben uns bemüht, nachzuweisen, daß dieses Gefühl der Verwandtschaft begründet war in der Empfindung gleicher Partialtöne der betreffenden Klänge. Nun sind diese Partialtöne allerdings vorhanden in der sinnlichen Empfindung des Gehörnervenapparates, und doch werden sie als für sich bestehende Empfindungen für gewöhnlich nicht Gegenstand der bewußten Wahrnehmung. Die bewußte Wahrnehmung des gewöhnlichen Lebens beschränkt sich darauf, den Klang, dem sie angehören, als Ganzes aufzufassen, etwa wie wir den Geschmack einer zusammengesetzten Speise als Ganzes auffassen, ohne uns klar zu machen, wieviel davon dem Salz, dem Pfeffer oder anderen Gewürzen und Zutaten angehört. Es gehört erst eine kritische Untersuchung unserer Gehörempfindungen als solcher dazu, damit wir die Existenz der Obertöne herausfinden. Daher ist denn auch der eigentliche Grund der melodischen Verwandtschaft zweier Klänge bis auf mehr oder weniger deutlich ausgesprochene Vermutungen, wie wir sie z. B. bei Rameau und d'Alembert finden, so lange Zeit nicht entdeckt worden, oder wenigstens nicht bis zu einer ganz klaren und bestimmten Darstellung gekommen. Ich glaube nun imstande gewesen zu sein, eine solche zu geben und den ganzen Zusammenhang deutlich dargelegt zu haben. Das ästhetische Problem ist damit zurückgeführt worden auf die gemeinsame Eigentümlichkeit aller unserer sinnlichen Wahrnehmungen, vermöge der wir zusammengesetzte Aggregate von

Empfindungen als die sinnlichen Symbole einfacher äußerer Objekte auffassen, ohne sie zu analysieren. Unsere Aufmerksamkeit ist bei der alltäglichen Beobachtung der Außenwelt so ausschließlich an die äußeren Objekte gefesselt, daß wir durchaus ungeübt bleiben, diejenigen Eigentümlichkeiten unserer Sinnesempfindungen als solche zur bewußten Beobachtung zu bringen, welche wir nicht als sinnlichen Ausdruck eines gesonderten äußeren Gegenstandes oder Vorganges kennen gelernt haben.

Nachdem die Musiker sich lange Zeit mit den melodischen Verwandtschaften der Töne begnügt hatten, fingen sie im Mittelalter an, ihre harmonische Verwandtschaft, die sich in der Konsonanz zeigt, zu benutzen. Die Wirkungen der verschiedenen Zusammenklänge beruhen wiederum zum Teil auf der Gleichheit oder Ungleichheit ihrer verschiedenen Partialtöne, zum Teil auf den Kombinationstönen. Während aber in der melodischen Verwandtschaft die Gleichheit der Obertöne nur mittels der Erinnerung an den vorausgegangenen Klang empfunden werden kann, wird sie in der Konsonanz durch eine Erscheinung der gegenwärtigen sinnlichen Empfindung festgestellt, nämlich durch die Schwebungen. In dem harmonischen Zusammenklang wird also die Verwandtschaft der Töne mit derjenigen größeren Lebhaftigkeit hervortreten, welche eine gegenwärtige Empfindung vor der dem Gedächtnis anvertrauten Erinnerung voraus hat. Gleichzeitig wächst der Reichtum der deutlich wahrnehmbaren Beziehungen mit der Zahl der gleichzeitig erklingenden Töne. Die Schwebungen nun sind zwar leicht als solche zu erkennen, wenn sie langsam gehen; die für die Dissonanzen charakteristischen Schwebungen gehören aber fast ohne Ausnahme zu den sehr schnellen und sind zum Teil überdeckt von anderen anhaltenden, nicht schwebenden Tönen, so daß eine sorgfältige Vergleichung langsamerer und schnellerer Schwebungen dazu gehörte, um sich zu überzeugen, daß das Wesen der Dissonanz eben in schnellen Schwebungen begründet sei. Langsame Schwebungen machen auch nicht den Eindruck der Dissonanz, sondern erst solche, denen das Ohr nicht mehr folgen kann und von denen es verwirrt wird. Auch hier also fühlt das Ohr den Unterschied zwischen dem ungestörten Zusammenklang zweier konsonanten Töne und dem gestörten, rauhen Zusammenklang einer Dissonanz. Worin aber die

Störung im letzteren Falle besteht, bleibt dem Hörer für gewöhnlich durchaus unbekannt.

Die Entwickelung der Harmonie gab Gelegenheit zu einer viel reicheren Entfaltung der musikalischen Kunst, als sie vorher möglich gewesen war, weil bei dem viel deutlicher ausgesprochenen verwandtschaftlichen Zusammenhang der Töne in den Akkorden und Akkordfolgen auch viel entlegenere Verwandtschaften, namentlich Modulationen in entfernte Tonarten, benutzt werden konnten, als sonst. Es wuchs dadurch der Reichtum der Ausdrucksmittel ebensogut, wie die Schnelligkeit der melodischen und harmonischen Übergänge, die man eintreten lassen konnte, ohne den Zusammenhang zu zerreißen.

Als man im 15. und 16. Jahrhundert die selbständige Bedeutung der Akkorde einsehen lernte, entwickelte sich das Gefühl für die Verwandtschaft der Akkorde, teils untereinander, teils mit dem tonischen Akkord, ganz nach demselben Gesetz, wie es für die Verwandtschaft der Klänge längst unbewußt ausgebildet war. Die Verwandtschaft der Klänge beruhte auf der Gleichheit eines oder mehrerer Partialtöne, die der Akkorde auf Gleichheit einer oder mehrerer ihrer Noten. Für den Musiker freilich ist das Gesetz von der Verwandtschaft der Akkorde und der Tonarten viel verständlicher, als das für die Verwandtschaft der Klänge. Er hört die gleichen Töne leicht heraus oder sieht sie in Noten verzeichnet vor sich. Der unbefangene Hörer aber macht sich den Grund des Zusammenhanges einer klar und wohlklingend hinfließenden Akkordreihe ebensowenig klar, als den einer wohlzusammenhängenden Melodie. Er wird aufgeschreckt, wenn ein Trugschluß kommt, er fühlt das Unerwartete desselben, ohne daß er notwendigerweise sich des Grundes bewußt wird.

Dann haben wir gesehen, daß der Grund, warum ein Akkord in der Musik als Akkord eines bestimmten Grundtones auftritt, wiederum auf der Zerlegung der Klänge in Partialtöne beruht, also wiederum auf Elementen der Empfindung, die nicht leicht zu Objekten der bewußten Wahrnehmung werden. Diese Beziehung zwischen Akkorden ist aber von einer großen Bedeutung, sowohl in dem Verhältnis des tonischen Akkordes zur Tonika, als in der Reihenfolge der Akkorde.

Die Anerkennung dieser Ähnlichkeiten zwischen den Klängen und Akkorden erinnert an andere ganz entsprechende Erfahrungen. Wir müssen oft die Ähnlichkeit der Gesichter zweier naher Verwandten anerkennen, während wir selten genug imstande sind, anzugeben, worauf diese Ähnlichkeit beruht, namentlich wenn Alter und Geschlecht verschieden sind und die gröberen Umrisse der Gesichtszüge deshalb die auffallendsten Verschiedenheiten darbieten. Und doch kann trotz dieser Unterschiede und trotzdem wir keinen einzigen Teil des Gesichtes zu bezeichnen wissen, der in beiden gleich sei, die Ähnlichkeit so außerordentlich auffallend und überzeugend sein, daß wir keinen Augenblick darüber im Zweifel sind. Ganz ähnlich verhält es sich mit der Anerkennung der Verwandtschaft zweier Klänge.

So sind wir auch oft imstande, mit voller Bestimmtheit anzugeben, daß ein von uns noch nie gehörter Satz eines Schriftstellers oder Komponisten, dessen andere Werke wir kennen, gerade diesem Autor angehören müsse. Zuweilen, aber bei weitem nicht immer, sind es einzelne zur Manier gewordene Redewendungen oder Tonfälle, welche unser Urteil bestimmen, aber auch hierbei werden wir in den meisten Fällen nicht imstande sein, anzugeben, worin die Ähnlichkeit mit den anderen bekannten Werken des Autors begründet ist.

Die Analogie zwischen diesen verschiedenen Fällen geht sogar noch weiter. Wenn Vater und Tochter eine auffallende Ähnlichkeit in der gröberen äußeren Form, etwa der Nase oder der Stirn, haben, so bemerken wir dies leicht, es beschäftigt uns aber nicht weiter. Ist aber die Ähnlichkeit so rätselhaft verborgen, daß wir sie nicht zu finden wissen, so fesselt uns dies, wir können nicht aufhören, die betreffenden Gesichter zu vergleichen, und wenn uns ein Maler zwei solche Köpfe darstellt, die etwa noch verschiedenen Charakterausdruck haben, und in denen doch eine schlagende und undefinierbare Ähnlichkeit vorherrscht, so würden wir unzweifelhaft dies als eine der Hauptschönheiten seines Gemäldes preisen. Auch würde diese unsere Bewunderung durchaus nicht bloß seiner technischen Fertigkeit gelten, wir würden in dieser Leistung nicht nur ein Kunststück sehen, sondern ein ungewöhnlich feines Gefühl für die Bedeutung der Gesichtszüge, und darin würde die künstlerische Berechtigung eines solchen Werkes liegen.

Ähnlich verhält es sich nun wiederum bei den musikalischen Intervallen. Die Ähnlichkeit der Oktave mit ihrem Grundton ist so deutlich ausgesprochen, daß sie auch dem stumpfesten Gehör auffällt; die Oktave erscheint daher fast als eine reine Wiederholung des Grundtones, wie sie ja denn auch in der Tat einen Teil vom Klang ihres Grundtones wiederholt, ohne etwas Neues hinzuzutun. Die Oktave ist daher in ihrer ästhetischen Wirkung ein vollkommen klares, aber wenig anziehendes Intervall. Die anziehendsten unter den Intervallen, sowohl in melodischer als harmonischer Anwendung, sind offenbar die Terzen und Sexten, und gerade diese stehen an der Grenze der dem Ohr noch verständlichen Intervalle. Die große Terz und große Sexte erfordern für ihre Verständlichkeit die Hörbarkeit der ersten fünf Partialtöne. Diese sind auch in guten musikalischen Klangfarben vorhanden. Die kleine Terz und kleine Sexte haben meist nur noch als Umkehrungen der vorigen Intervalle ihre Berechtigung. Die komplizierteren Intervalle der Tonleiter haben keine direkte und leicht verständliche Verwandtschaft mehr. Ihnen kommt auch nicht mehr der Reiz zu, den die Terzen haben.

Es ist übrigens nicht nur eine äußerliche gleichgültige Gesetzmäßigkeit, welche durch die Benutzung der auf Klangverwandtschaft gegründeten diatonischen Leiter in das Tonmaterial der Musik gebracht wird, wie etwa der Rhythmus eine solche äußerliche Ordnung in die Worte der Poesie bringt. Ich habe vielmehr schon im vierzehnten Abschnitt auseinander gesetzt, wie durch diese Konstruktion der Tonleiter ein Maß für die Abstände der Töne in derselben gegeben wird, so daß wir in unmittelbarer Empfindung zwei gleiche Intervalle, die in verschiedenen Abschnitten der Leiter liegen, als gleich anerkennen. Der melodische Fortschritt durch das Intervall der Quinte z. B. ist immer dadurch charakterisiert, daß der zweite Partialton des zweiten Klanges gleich dem dritten des ersten ist. Dadurch wird eine Bestimmtheit und Sicherheit in der Abmessung der Intervalle für die Empfindung hergestellt, wie sie weder im Bereich des übrigens so ähnlichen Systemes der Farben, noch in der Abmessung der bloßen Intensitätsunterschiede der verschiedenen Sinnesempfindungen möglich ist.

Hierauf beruht nun auch die charakteristische Ähnlichkeit zwischen den Verhältnissen der Tonleiter und denen im Raum, welche, wie

mir scheint, von allerwesentlichster Bedeutung für die eigentümlichen Wirkungen der Musik ist. Es ist ein wesentlicher Charakter des Raumes, daß in jeder Stelle desselben die gleichen Körperformen Platz finden und die gleichen Bewegungen vor sich gehen können. Alles, was in einem Teil des Raumes vor sich gehen kann, kann auch in jedem anderen vor sich gehen und von uns in derselben Weise wahrgenommen werden. Ebenso ist es in der Tonleiter. Jede melodische Phrase, jeder Akkord, die in irgend einer Höhe ausgeführt worden sind, können in jeder anderen Lage wiederum so ausgeführt werden, daß wir die charakteristischen Zeichen ihrer Ähnlichkeit sogleich unmittelbar empfinden. Andererseits können auch verschiedene Stimmen, welche ähnliche oder verschiedene melodische Phrasen ausführen, gleichzeitig in der Breite der Tonleiter, wie zwei Körper im Raum, nebeneinander bestehen und ohne gegenseitige Störung wahrgenommen werden, letzteres namentlich, wenn sie in den akzentuierten Taktteilen miteinander konsonant sind. Dadurch ist in wesentlichen Verhältnissen eine so große Ähnlichkeit der Tonleiter mit dem Raum gegeben, daß nun auch die Änderung der Tonhöhe, die wir ja oft bildlich als Bewegung der Stimme nach der Höhe oder Tiefe bezeichnen, eine leicht erkennbare und hervortretende Ähnlichkeit mit der Bewegung im Raum erhält. Dadurch wird es weiter möglich, daß die musikalische Bewegung auch die für die treibenden Kräfte charakteristischen Eigentümlichkeiten der Bewegung im Raum nachahmt und somit auch ein Bild der der Bewegung zugrunde liegenden Antriebe und Kräfte gibt. Darauf wesentlich beruht, wie mir scheint, ihre Fähigkeit, Gemütsstimmungen auszudrücken.

Ich möchte hierbei nicht ausschließen, daß die Musik in ihren Anfängen und in ihren einfachsten Formen nicht zuerst künstlerische Nachahmung der instinktiven Modulationen der Stimme, welche den verschiedenen Gemütszuständen entsprechen, gewesen sei. Aber ich glaube nicht, daß dies der oben gegebenen Erklärung widerspricht; denn ein großer Teil der natürlichen Ausdrucksmittel der Stimme läßt sich darauf zurückführen, daß ihr Rhythmus und ihre Akzentuierung unmittelbarer Ausdruck der Geschwindigkeit und Heftigkeit der entsprechenden psychischen Antriebe ist, daß Anstrengung die Stimme in die Höhe treibt, das Streben, einem anderen einen an-

genehmen Eindruck zu machen, für sie eine weichere, sinnlich angenehmere Klangfarbe wählen macht usw. Das Streben, die unwillkürlichen Modulationen der Stimme nachzuahmen und deren Rezitation reicher und ausdrucksvoller zu machen, mag deshalb sehr wohl unsere Vorfahren auf die Erfindung der ersten musikalischen Ausdrucksmittel geführt haben, sowie denn Nachahmung einer weinenden, schreienden, schluchzenden Stimme ebensogut wie andere musikalische Malereien an einzelnen Stellen auch in der ausgebildeten, namentlich dramatischen Musik eine Rolle spielen kann, obgleich die genannten Modifikationen solche sind, bei denen nicht nur freie geistige Antriebe, sondern auch wirklich mechanisch und unwillkürlich eintretende Muskelkontraktionen eine Rolle spielen. Aber es geht offenbar schon jede vollständig ausgebildete Melodie weit hinaus über die Naturnachahmung, selbst wenn man Fälle der allerreichsten leidenschaftlichen Stimmveränderung herbeiziehen wollte. Ja dadurch, daß die Musik den stufenweisen Fortschritt im Rhythmus und in der Tonleiter einführt, macht sie sich eine auch nur angenäherte treue Naturnachahmung geradezu unmöglich, denn die meisten leidenschaftlichen Affektionen der Stimme charakterisieren sich gerade durch schleifende Übergänge der Tonhöhen. Die Naturnachahmung in der Musik ist dadurch in derselben Weise unvollkommen geworden, wie die Nachahmung eines Gemäldes durch eine Stramin-stickerei in abgesetzten Quadraten und abgesetzten Farbentönen. Noch mehr entfernte sie sich von der Natur, indem sie den größeren Umfang, die viel größere Beweglichkeit, die fremdartigen Klangfarben der Instrumente einführte, durch welche das Feld der erreichbaren musikalischen Effekte so sehr viel reicher geworden ist, als es bei Benutzung der menschlichen Stimmen allein gewesen ist und sein würde.

Wenn es also auch wahrscheinlich richtig ist, daß die Menschheit in ihrer historischen Entwickelung die ersten musikalischen Ausdrucksmittel der menschlichen Stimme abgelernt hat, so wird schwerlich zu leugnen sein, daß diese selben Ausdrucksmittel der melodischen Bewegung in der künstlerisch entwickelten Musik durchaus unabhängig von ihrer Anwendung in den Modulationen der menschlichen Stimme wirken und eine allgemeinere Bedeutung haben, als die von instinktiven angeborenen Lauten. Daß dies so ist, zeigt vor allen

Dingen die moderne Entwickelung der reinen Instrumentalmusik, deren Wirksamkeit und künstlerische Berechtigung wir uns nicht wegleugnen zu lassen brauchen, wenn wir sie auch noch nicht in allen Einzelheiten erklären können.

Ich schließe hiermit meine Arbeit. Soviel ich übersehe, habe ich sie so weit fortgeführt, als die physiologischen Eigentümlichkeiten der Gehörempfindung einen direkten Einfluß auf die Konstruktion des musikalischen Systemes ausüben, so weit, als die Arbeit hauptsächlich einem Naturforscher zufallen mußte. Denn wenn sich auch naturwissenschaftliche Fragen mit ästhetischen mischten, so waren die letzteren doch von verhältnismäßig einfacher Art, die ersteren jedenfalls viel verwickelter. Dies Verhältnis muß sich notwendig umkehren, wenn man versuchen wollte, in der Ästhetik der Musik weiter vorzuschreiten, wenn man zur Lehre vom Rhythmus, von den Kompositionsformen, von den Mitteln des musikalischen Ausdruckes übergehen wollte. In allen diesen Gebieten werden die Eigentümlichkeiten der sinnlichen Empfindung noch hin und wieder einen Einfluß haben, aber doch wohl nur in sehr untergeordneter Weise. Die eigentliche Schwierigkeit wird in der Verwickelung der psychischen Motive liegen, die sich hier geltend machen. Freilich beginnt auch hier erst der interessantere Teil der musikalischen Ästhetik — handelt es sich doch darum, schließlich die Wunder der großen Kunstwerke zu erklären, die Äußerungen und Bewegungen der verschiedenen Seelenstimmungen kennen zu lernen. So lockend aber auch das Ziel sein möge, ziehe ich es doch vor, diese Untersuchungen, in denen ich mich zu sehr als Dilettant fühlen würde, anderen zu überlassen, und selbst auf dem Boden der Naturforschung, an den ich gewöhnt bin, stehen zu bleiben.

Beilage I.

Elektromagnetische Treibmaschine für die Sirene.

Zu Seite 23.

Ich habe neuerdings eine kleine elektromagnetische Maschine von konstanter Rotationsgeschwindigkeit konstruiert, welche sich für die Bewegung einer Sirene als sehr vorteilhaft erwies. Ein rotierender Elektromagnet, in welchem die Stromrichtung bei jeder halben Umdrehung gewechselt wird, bewegt sich zwischen zwei festen Magnetpolen. Der Strom in diesem Elektromagneten wird durch die Zentrifugalkraft einer an der Umdrehungsachse desselben befestigten Metallmasse unterbrochen, sobald die Geschwindigkeit den verlangten Grad zu überschreiten anfängt. Zwei Spiralfedern, deren Elastizität der Zentrifugalkraft entgegenwirkt, können nach Belieben stärker oder schwächer gespannt werden. Dadurch kann die Geschwindigkeit der Drehung auf jedem beliebigen Grade erhalten werden. Eine Abbildung und Beschreibung dieser Maschine ist durch Herrn S. Exner gegeben in den Sitzungsberichten der Wiener Akademie, Math. Naturw. Klasse 58, 2. Abt. 1868, 8. Okt.

Die Maschine ist neuerdings (1875) noch dadurch verbessert worden, daß der Zentrifugalregulator von ihr getrennt wurde und dieser nur den schwachen Strom für ein Relais öffnet und schließt. Letzteres öffnet oder schließt erst den starken Strom, der die elektromagnetische Maschine treibt.

Die Sirene wird durch einen dünnen Schnurlauf mit der Maschine verbunden und braucht dann nicht angeblasen zu werden; ich brachte vielmehr auf der Scheibe eine kleine aus steifem Papier verfertigte Turbine an, welche die Luft durch die Öffnungen trieb, so oft diese mit denen des Kastens zusammenfielen. Bei dieser Einrichtung erhielt ich außerordentlich konstante Töne von der Sirene, so daß sie mit den besteingerichteten Orgelpfeifen wetteifern konnte. Neuerdings habe ich der Sirene gerade gebohrte Löcher gegeben, so daß die Stärke des Windes auf ihren Lauf keinen Einfluß mehr hat, und blase durch den Kasten an.

Beilage II.

Maße und Verfertigung von Resonatoren.

Zu Seite 75.

Am wirksamsten sind die Resonatoren von kugelförmiger Gestalt mit kurzem trichterförmigen Hals, den man in das Ohr einsetzt, wie Fig. 16*a*, S. 73. Der Vorzug dieser Resonatoren beruht teils darauf, daß ihre übrigen eigenen Töne sehr weit entfernt vom Grundton sind und nur eine geringe Verstärkung empfangen, teils darauf, daß die Kugelform die kräftigste Resonanz gibt. Aber die Wandungen der Kugel müssen fest und glatt sein, um den kräftigen Luftschwingungen im Inneren den nötigen Widerstand leisten zu können, und um die Bewegung der Luft so wenig wie möglich durch Reibung zu stören. Anfangs benutzte ich kugelförmige Glasgefäße, wie ich sie eben vorfand, Retortenvorlagen z. B, in deren eine Mündung ich ein der Ohröffnung angepaßtes Glasrohr einsetzte. Dann hat mir Herr R. Koenig (Verfertiger akustischer Instrumente, Paris) eine abgestimmte Reihe solcher Glaskugeln

verfertigt und diese später aus Messing treiben lassen in der Form, welche in Fig. 16*a* auf S. 73 dargestellt ist. Dies ist die zweckmäßigste Form der Resonatoren. ihre Tonhöhe kann, wenn die Öffnungen verhältnismäßig sehr eng sind, nach der von mir [1]) entwickelten Formel berechnet werden:

$$n = \frac{a\sqrt[4]{\sigma}}{\sqrt[4]{\pi^5}\,\sqrt[4]{2S}},$$

wo a die Schallgeschwindigkeit ist, σ die Fläche der kreisförmigen Öffnung und S das Volumen des Hohlraumes. Oder wenn wir für a den Wert nehmen

$$a = 332\,260\,\text{mm},$$

der der Temperatur von 0° bei trockener Luft entspricht, so ergibt dies

$$n = 56174\sqrt[4]{\frac{\sigma}{S^2}}\cdot\frac{\text{mm}^2}{\text{sec}}.$$

Herr Sondhauss hatte dieselbe Formel empirisch gefunden und nur den Zahlenkoeffizienten gleich 52400 bestimmt, ein Wert, der sich für Kugeln mit nicht ganz kleinen Öffnungen besser den Versuchen anschließt. Wenn der Durchmesser der Öffnung kleiner als $^1/_{10}$ vom Durchmesser der Kugel ist, stimmt die theoretisch abgeleitete Formel gut mit Versuchen von Wertheim. Bei Resonatoren, deren Mündung zwischen $^1/_4$ und $^1/_5$ vom Durchmesser der Kugel hat, ist der Koeffizient empirisch von mir bis zu 47000 gefunden worden. Die zweite Öffnung des Resonators kann als geschlossen betrachtet werden, da sie fest an das Ohr gesetzt wird. Ist der Hohlraum kugelförmig vom Radius R und r der Radius der Öffnung, so wird die obige Formel:

$$n = a\sqrt{\frac{3r}{8\pi^3 . R^3}}.$$

Ich gebe hier noch das Verzeichnis der Maße einiger meiner Glasresonatoren:

Tonhöhe	Durchmesser der Kugel mm	Durchmesser der Öffnung mm	Volumen des Hohlraumes ccm	Bemerkungen
1. *g*	154	35,5	1773	Hals trichterförmig
2. *b*	131	28,5	1092	
3. *c'*	130	30,2	1053	
4. *e'*	115	30	546	
5. *g'*	79	18,5	235	
6. *b'*	76	22	214	
7. *c''*	70	20,5	162	
8. *b'*	53,5	8	74	Hals zylindrisch
9. *b''*	46	15	49	Ebenso; Öffnung seitlich
10. *d'''*	43	15	37	Hals zylindrisch

[1]) Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden im Journ. f. reine u. angew. Mathematik 57, Gleichung 30a u. ff.; Wiss. Abh. 1, 378 u. f.

[2]) Der neuere Wert $a = 330600$ mm würde 55892 als Koeffizienten ergeben.

Kleinere Kugeln fand ich nicht mehr gut anwendbar. Um die Resonatoren stimmbar zu machen, hat Herr Koenig sie auch aus zwei ineinander verschiebbaren kurzen Zylindern hergestellt, deren jeder am äußeren Ende mit einem durchbohrten Deckel versehen ist. Die eine Öffnung dient zur Verbindung mit dem Ohr oder einer mitschwingenden Flamme (s. unten), die andere ist frei [1]). Als Maße für die Anfertigung solcher Röhren können die in Beilage IV gegebenen dienen, da die zweite Öffnung nichts ändert, wenn sie fest in das Ohr eingesetzt ist.

Da die Metallkugeln mühsam anzufertigen und daher verhältnismäßig teuer sind, kann man auch Doppelkegel aus Blech oder Pappe anwenden, deren Spitzen weggenommen sind. Der gegen das Ohr gewendete Kegel wird spitzer gemacht, so daß sein Ende gut in das Ohr paßt.

Leicht herzustellen und für die meisten Anwendungen sehr brauchbar sind auch konische Röhren aus dünnem Zinkblech, wie sie mir Herr Appun in Hanau geliefert hat. Die letzteren verstärken aber gleichzeitig auch alle harmonischen Obertöne ihres Grundtones. Ihre Länge ist nahehin gleich zu machen der der offenen Orgelpfeifen von derselben Tonhöhe.

Die Resonatoren, deren Öffnung sehr eng ist, geben im allgemeinen eine viel bedeutendere Verstärkung des Tones, aber es wird auch eine desto genauere Übereinstimmung der Tonhöhe des zu hörenden Tones mit dem Eigenton des Resonators notwendig. Es ist wie bei den Mikroskopen; je stärker die Vergrößerung, desto kleiner das Gesichtsfeld. Durch Verengerung der Öffnung macht man die Resonatoren gleichzeitig tiefer, und es ist dies ein leichtes Mittel, um sie auf die verlangte Tonhöhe zu bringen. Aber aus dem angegebenen Grunde darf man die Öffnung nicht zu sehr verengern.

Zu erwähnen ist hier noch die von Herrn Koenig erfundene Methode, Luftschwingungen auf Gasflammen zu übertragen und dadurch sichtbar zu machen. Solche Flammen lassen sich sehr gut mit Resonatoren verbinden, am besten mit solchen, deren Form kugelig ist und die zwei gleich weite Öffnungen haben. An die eine dieser Öffnungen wird die kleine Gaskammer angefügt. Diese Kammer ist ein kleiner flacher Hohlraum, etwa so groß, daß zwei Frankenstücke darin aufeinander liegen können; sie ist in eine Holzscheibe eingeschnitten und an der dem Resonator zugekehrten Seite durch eine sehr dünne Kautschukmembran geschlossen, welche zwar die Luft des Resonators von dem Gas der Kammer vollständig trennt, aber doch erlaubt, daß die Erschütterungen der ersteren sich dem letzteren ungehindert mitteilen. Durch die Holzscheibe treten zwei enge Röhren in die Kammer, von denen die eine das Leuchtgas einführt, die andere ausführt. Letzteres endigt in eine feine Spitze, an der man das ausströmende Gas anzündet. Sowie die Luftmasse im Resonator in Schwingung gerät, zittert auch die Flamme, indem sie abwechselnd klein und groß wird. Diese Oszillationen der Flamme geschehen freilich so schnell und regelmäßig, daß unmittelbar betrachtet die Flamme ganz ruhig erscheint. Doch kann man den veränderten Zustand derselben zunächst schon an ihrer veränderten Gestalt und Farbe erkennen. Um z. B. Schwebungen zweier im Resonator widerhallender Töne zu erkennen, genügt schon der unmittelbare Anblick der Flamme, indem diese dabei zwischen ihrer ruhenden und ihrer oszillierenden Form wechselt.

[1]) Pogg. Ann. 146, 189.

Will man die einzelnen Oszillationen sehen, so muß man die Flamme in einem rotierenden Spiegel betrachten, in welchem die nicht zitternde Flamme zu einem langen gleichmäßigen Lichtstreifen ausgezogen erscheint, die zitternde dagegen in eine Reihe einzelner Lichtbildchen getrennt. So kann man es einer großen Anzahl von Zuhörern gleichzeitig wahrnehmbar machen, ob ein gegebener Ton den Resonator erregt oder nicht.

Ein äußerst empfindliches Mittel, die Schwingungen der Luft in einem Resonator sichtbar zu machen, ist ein flaches Flüssigkeitshäutchen aus glycerinhaltigem Seifenwasser, mit dem man seine Öffnung überzieht.

Beilage III.

Die Bewegung gezupfter Saiten.

Zu Seite 90.

Es sei x die Entfernung eines Punktes einer Saite von ihrem einen Endpunkt, l die Länge der Saite, so daß für ihren einen Endpunkt $x = 0$, für den anderen $x = l$. Es genügt, den Fall zu untersuchen, wo die Saite in einer einzigen durch ihre Gleichgewichtslage gelegten Ebene hin und her schwingt. Es sei y die Entfernung des Punktes x aus der Gleichgewichtslage zur Zeit t; ferner sei μ das Gewicht der Längeneinheit und S die Spannung der Saite, so sind die Bedingungen ihrer Bewegung

$$\mu \frac{d^2 y}{dt^2} = S \frac{d^2 y}{dx^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

und da die Enden der Saite als unbeweglich angenommen werden, muß sein

$$y = 0,$$

wenn

$$x = 0 \quad \text{oder} \quad x = l \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1a)$$

Das allgemeinste Integral der Gleichung (1), welches die Bedingungen (1a) erfüllt und einer periodischen Bewegung der Saite entspricht, ist folgendes:

$$\left.\begin{aligned} y = {} & A_1 \sin\frac{\pi x}{l} \cos 2\pi n t + A_2 \sin\frac{2\pi x}{l} \cos 4\pi n t \\ & + A_3 \sin\frac{3\pi x}{l} \cos 6\pi n t + \text{usw.} \\ & + B_1 \sin\frac{\pi x}{l} \sin 2\pi n t + B_2 \sin\frac{2\pi x}{l} \sin 4\pi n t \\ & + B_3 \sin\frac{3\pi x}{l} \sin 6\pi n t + \text{usw.} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (1b)$$

worin

$$n^2 = \frac{S}{4\mu l^2}$$

und A_1, A_2, A_3 sowie B_1, B_2, B_3 usw. beliebige konstante Koeffizienten sind. Deren Größe kann bestimmt werden, wenn für einen bestimmten Wert von t Form und Geschwindigkeit der Saite bekannt sind.

Für den Zeitpunkt $t = 0$ wird die Form der Saite folgende:

$$y = A_1 \sin\frac{\pi x}{l} + A_2 \sin\frac{2\pi x}{l} + A_3 \sin\frac{3\pi x}{l} + \text{usw.} \quad \cdots \quad (1\,c)$$

und deren Geschwindigkeit:

$$\frac{dy}{dt} = 2\pi n \left\{ B_1 \sin\frac{\pi x}{l} + 2 B_2 \sin\frac{2\pi x}{l} + 3 B_3 \sin\frac{3\pi x}{l} + \text{usw.} \right\} \quad \cdots \quad (1\,d)$$

Denken wir uns nun, die Saite sei mit einem spitzen Stift zur Seite gezogen worden, und zur Zeit $t = 0$ habe man den Stift fortgezogen, so daß in diesem Augenblick die Schwingungen begonnen haben, dann hat die Saite zur Zeit $t = 0$ keine Geschwindigkeit, und für jeden Wert von x ist $\frac{dy}{dt} = 0$; dies kann aber nur der Fall sein, wenn in Gleichung (1 d)

$$0 = B_1 = B_2 = B_3 \text{ usw.}$$

Die Koeffizienten A hängen von der Gestalt der Saite zur Zeit $t = 0$ ab. Die Saite mußte in dem Augenblick, wo der Stift sie los ließ, die auf S. 93 in Fig. 18 A dargestellte Form zweier gerader Linien haben, die von der Spitze des Stiftes nach den beiden Befestigungspunkten der Saite gezogen sind. Nennen wir die Werte von x und y für den Saitenpunkt, an dem der Stift angriff, bzw. a und b, so waren zur Zeit $t = 0$ die Werte von y, wenn

$$a > x > 0,$$

$$y = \frac{b\,x}{a} \quad \cdots \quad (2)$$

wenn

$$l > x > a$$

$$y = b\frac{l - x}{l - a} \quad \cdots \quad (2\,a)$$

und es müssen die Werte von y aus (1 c) und (2) oder bzw. (2 a) identisch werden.

Um den Koeffizienten A_m zu finden, verfährt man bekanntlich so, daß man beide Seiten der Gleichung (1 c) mit $\sin\frac{m\pi x}{l}\,dx$ multipliziert und von $x = 0$ bis $x = l$ integriert. Dann reduziert sich die Gleichung (1 c) auf

$$A_m \int_0^l \sin^2\frac{m\pi x}{l}\,dx = \int_0^l y \sin\frac{m\pi x}{l}\,dx \quad \cdots \quad (2\,b)$$

worin für y die Werte aus (2) und (2 a) zu setzen sind. Wenn in (2 b) die Integrationen ausgeführt werden, erhält man:

$$A_m = \frac{2\,b\,l^2}{m^2\pi^2\,a(l-a)} \sin\frac{m\pi a}{l} \quad \cdots \quad (3)$$

Es wird also A_m gleich Null werden und somit der $m$te Ton der Saite wegfallen, wenn

$$\sin\frac{m\pi a}{l} = 0,$$

d. h. wenn $a = \frac{l}{m}$ oder $= \frac{2\,l}{m}$ oder $= \frac{3\,l}{m}$ usw. Denkt man sich also die Saite in m gleiche Teile geteilt und in einem der Teilpunkte angeschlagen, so fällt ihr $m$ter Ton weg, dessen Knotenpunkte auf die genannten Teilpunkte fallen.

Jeder Knotenpunkt für den $m$ten Ton ist auch Knotenpunkt für den 2 $m$ten, 3 $m$ten, 4 $m$ten usw., es fallen also auch alle die letzteren Töne gleichzeitig fort.

Man kann das Integral der Gleichung (1) bekanntlich auch in folgender Form darstellen:

$$y = \varphi_{(x-at)} + \psi_{(x+at)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

wo $a^2 = \frac{S}{\mu}$, φ und ψ aber willkürliche Funktionen sind. Die Funktion $\varphi_{(x-at)}$ bedeutet eine beliebige Form der Saite, welche mit der Geschwindigkeit a, sonst aber ohne Veränderung, in Richtung der positiven x fortrückt, die andere Funktion $\psi_{(x+at)}$ eine ebensolche, die mit gleicher Geschwindigkeit in Richtung der negativen x fortrückt. Beide Funktionen muß man von $x = -\infty$ bis $x = +\infty$ gegeben denken für einen bestimmten Wert der Zeit, dann ist die Bewegung der Saite bestimmt.

Unsere Aufgabe, die Bewegung der gezupften Saite zu bestimmen, wird in dieser zweiten Form gelöst sein, wenn wir die Funktionen φ und ψ so bestimmen können, daß

1. für die Werte $x = 0$ und $x = l$ der Wert von y für jeden Wert von t konstant gleich 0 wird. Dies geschieht, wenn für jeden Wert von t

$$\varphi_{(-at)} = -\psi_{(+at)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4\,a)$$

$$\varphi_{(l-at)} = -\psi_{(l+at)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4\,b)$$

Setzen wir in der ersten Gleichung $at = -v$, in der zweiten $l + at = -v$, so erhalten wir

$$\varphi_v = -\psi_{(-v)}$$

$$\varphi_{(2l+v)} = -\psi_{(-v)},$$

also

$$\varphi_{(2l+v)} = \varphi_v \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Die Funktion φ ist also periodisch; sobald ihr Argument um $2l$ wächst, erhält sie wieder denselben Wert. Das gleiche läßt sich ebenso für ψ finden.

2. Für $t = 0$ muß sein $\frac{dy}{dt} = 0$ zwischen den Werten $x = 0$ bis $x = l$. Daraus folgt, wenn wir $\frac{d\psi_v}{dv}$ mit ψ' bezeichnen, indem wir den Wert von $\frac{dy}{dt}$ aus Gleichung (4) gleich Null setzen:

$$\varphi'_{(x)} = \psi'_{(x)}.$$

Wenn wir dies nach x integrieren:

$$\varphi_x = \psi_x + C.$$

Und da sich weder y noch $\frac{dy}{dt}$ ändert, wenn wir zu φ dieselbe Konstante addieren und von ψ abziehen, so ist die Konstante C vollkommen willkürlich und wir können sie gleich Null setzen, also schreiben:

$$\varphi_{(x)} = \psi_{(x)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5\,a)$$

3. Da endlich zur Zeit $t = 0$ innerhalb $x = 0$ bis $x = l$ die Größe

$$y = \varphi_{(x)} + \psi_{(x)} = 2\,\varphi_{(x)}$$

den in Fig. 18 *A* dargestellten Wert haben soll, so geben die Ordinaten dieser Figur auch gleich den Wert von $2\,\varphi_{(x)}$ und von $2\,\psi_{(x)}$ gemäß Gleichung (5):

zwischen $x = 0$ und $x = l$
zwischen $x = 2l$ und $x = 3l$
zwischen $x = 4l$ und $x = 5l$ usw.

Da dagegen aus (4a), (4b) und (5) folgt $\varphi_{(-v)} = -\varphi_{(v)}$ und $\varphi_{(l-v)} = -\varphi_{(l+v)}$, so ist der Wert von $2\varphi_{(x)}$ gegeben durch die Kurve Fig. 18 *C*

zwischen $x = -l$ und $x = 0$
zwischen $x = -3l$ und $x = -2l$
und ebenso zwischen $x = l$ und $x = 2l$
zwischen $x = 3l$ und $x = 4l$ usw.

So sind die Funktionen φ und ψ vollständig bestimmt, und indem man die durch beide dargestellten Wellenlinien mit der Geschwindigkeit a nach entgegengesetzten Richtungen fortschreiten läßt, erhält man die Saitenformen, welche in Fig. 18 abgebildet sind und welche die Veränderungen der Saite nach je ein Zwölftel ihrer Schwingungsdauer darstellen.

Beilage IV.

Herstellung einfacher Töne durch Resonanz.

Zu Seite 95 und 119.

Die Theorie der Resonanz lufthaltiger Röhren und Hohlräume, soweit sie bisher mathematisch ausführbar erschien, habe ich gegeben in meinem Aufsatz: Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden in Crelles Journ. f. Mathematik **57**. Eine Vergleichung der Obertöne von Stimmgabeln und dazu gehörigen Resonanzröhren findet sich in meinem Aufsatz: Über Kombinationstöne in Pogg. Ann. **99**, 509 und 510 [1]).

Ich füge hier gleich die Maße der S. 95 erwähnten Resonanzröhren hinzu, welche für mich von Herrn Fessel in Cöln in Verbindung mit den später zu beschreibenden elektromagnetisch bewegten Stimmgabeln verfertigt waren. Dies waren zylindrische Röhren von Pappe; die Grundflächen des Zylinders waren aus Scheiben von Zinkblech gemacht, die eine ganz verschlossen, die andere mit einer runden Öffnung versehen. Diese Röhren hatten also überhaupt nur eine Öffnung, nicht zwei, wie die Resonatoren, welche bestimmt sind, an das Ohr gesetzt zu werden. Eine fertige Resonanzröhre solcher Art kann man tiefer machen, wenn man ihre Öffnung verengert. Um sie, wenn es nötig war, höher zu machen, habe ich etwas Wachs hineingeworfen und ihre geschlossene Grundfläche auf einen heißen Ofen gestellt, bis das Wachs geschmolzen war und sich über den Boden gleichmäßig ausgebreitet hatte. Man läßt es dann in derselben Stellung der Röhre erkalten. Ob eine Röhre etwa zu hoch oder zu tief für ihre Stimmgabel ist, prüft man, indem man ihre Öffnung ein wenig verdeckt, während die schwingende Stimmgabel vor ihr steht. Wird die Resonanz stärker durch Zudecken, so ist die Röhre zu hoch gestimmt. Fängt dagegen gleich vom Beginn des Zudeckens die Resonanz an, sehr entschieden abzunehmen, so ist die Röhre meist etwas zu tief gestimmt. Die Maße in Millimetern sind folgende:

---

[1]) Die dort erwähnten harmonischen Obertöne der in der Nähe einer Stimmgabel schwingenden Luft sind auch von Herrn Stefan (Sitzungsber. d. Wien. Akad. **61**, 2. Abt., S. 491—498) und von Herrn Quincke (Pogg. Ann. **28**) mit dem Interferenzapparat beobachtet. Wiss. Abh. **1**, 303 und 263.

Nummer	Tonhöhe	Länge der Röhre	Durchmesser der Röhre	Durchmesser der Öffnung
1	B	425	138	31,5
2	b	210	82	23,5
3	f'	117	65	16
4	b'	88	55	14,3
5	d''	58	55	14
6	f''	53	44	12,5
7	as''	50	39	11,2
8	b''	40	39	11,5
9	d'''	35	30,5	10,3
10	f'''	26	26	8,5

Die Theorie des Mitschwingens der Saiten läßt sich am besten an dem S. 95 besprochenen Versuch entwickeln. Wir behalten die in Beilage III gewählten Bezeichnungen bei und nehmen an, daß das Ende der Saite, für welches $x = 0$, mit dem Stiel der Stimmgabel verbunden sei und dessen Bewegung mitmachen müsse. Diese sei gegeben durch die Gleichung

$$y = A \sin m t \quad \text{für} \quad x = 0 \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

Das andere Ende sei auf den Steg gestützt, der auf dem Resonanzboden ruht. Auf den Steg wirken folgende Kräfte:

1. Der Druck der Saite, welcher bald größer, bald kleiner wird, je nach dem Winkel, unter welchem das Endstück der Saite gegen den Steg gerichtet ist. Die Tangente des Winkels, welcher zwischen der veränderlichen Richtung der Saite und ihrer Gleichgewichtslage eingeschlossen ist, ist $\frac{dy}{dx}$, und wir können deshalb den veränderlichen Teil des Druckes setzen gleich

$$- S \frac{dy}{dx}$$

für den Wert $x = l$, wenn der Steg auf Seite der negativen y liegt.

2. Die elastische Kraft des Resonanzbodens, welche den Steg in seine Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt, können wir setzen gleich $- f^2 y$.

3. Der Resonanzboden, der sich mit dem Steg bewegt, erleidet Widerstand von der Luft, an die er einen Teil seiner Bewegung abgibt; wir können annähernd den Luftwiderstand der Geschwindigkeit seiner Bewegung proportional setzen, also gleich $- g^2 \frac{dy}{dt}$.

Dadurch erhalten wir für die Bewegung des Steges, dessen Masse M sein mag, und für die entsprechende Bewegung des darauf ruhenden Endes der Saite:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = - S \frac{dy}{dx} - f^2 y - g^2 \frac{dy}{dt} \quad \text{für } x = l \ldots\ldots (6a)$$

Für die Bewegung der übrigen Punkte der Saite haben wir, wie in Beilage III, die Bedingung:

$$\mu \frac{d^2 y}{dt^2} = S \frac{d^2 y}{dx^2} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Da jede Bewegung einer solchen Saite fortdauernd teilweise an die Luft im Resonanzkasten abgegeben wird, so muß sie erlöschen, wenn sie nicht durch eine dauernde Ursache dauernd unterhalten wird. Wir können also von dem veränderlichen Anfangszustand der Bewegung absehen und gleich diejenige periodische Bewegung suchen, welche schließlich bestehen bleibt unter dem Einfluß der periodischen Erschütterung des einen Endes der Saite durch die Stimmgabel. Daß die Periode der Saitenbewegung der Periode der Schwingungen der Gabel gleich sein muß, ist leicht ersichtlich. Das Integral der Gleichung (1), welches wir suchen, wird also von der Form sein müssen:

$$\left.\begin{aligned} y = {} & D\cos(px)\sin(mt) + E\cos(px)\cos(mt) \\ & + F\sin(px)\sin(mt) + G\sin(px)\cos(mt) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots (7)$$

Um die Gleichung (1) zu erfüllen, muß hierin sein:

$$\mu m^2 = S p^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7a)$$

Aus der Gleichung (7) ergibt sich für $x = 0$ folgender Wert von y:

$$y = D\sin(mt) + E\cos(mt),$$

durch Vergleichung mit der Gleichung (6) erhalten wir hieraus:

$$D = A \quad E = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

Die beiden anderen Koeffizienten der Gleichung (7), nämlich F und G, müssen vermittelst der Gleichung (6a) bestimmt werden. Diese zerfällt bei Substitution der Werte von y aus (7) in zwei Gleichungen, indem man die Summe der mit $\sin(mt)$ multiplizierten Glieder für sich gleich Null setzen muß, und ebenso die Summe der mit $\cos(mt)$ multiplizierten Glieder. Diese beiden Gleichungen sind:

$$\left.\begin{aligned} F[(f^2 - Mm^2)\sin(pl) + pS\cos(pl)] - Gmg^2\sin(pl) \\ = -A[(f^2 - Mm^2)\cos pl - pS\sin(pl)] \\ Fmg^2\sin(pl) + G[(f^2 - Mm^2)\sin(pl) + pS\cos(pl)] = -Ag^2 m\cos(pl) \end{aligned}\right\} \cdot \quad (8a)$$

Setzt man zur Abkürzung

$$\left.\begin{aligned} \frac{pS}{f^2 - Mm^2} &= tang\, k \\ (f^2 - Mm^2)^2 + p^2S^2 &= C^2 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8b)$$

so erhält man die Werte von F und G wie folgt:

$$\left.\begin{aligned} F &= -\frac{A}{2}\cdot\frac{C^2\sin 2(pl+k) + g^4m^2\sin 2(pl)}{C^2\sin^2(pl+k) + g^4m^2\sin^2(pl)} \\ G &= -A\cdot\frac{Cmg^2\sin k}{C^2\sin^2(pl+k) + m^2g^4\sin^2(pl)} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots (8c)$$

Wenn man die Amplitude der Schwingung des Endpunktes der Saite, welcher auf dem Steg liegt und den Resonanzboden erschüttert, mit I bezeichnet, so ist nach Gleichung (7)

$$I^2 = [F\sin(pl) + A\cos(pl)]^2 + G^2\sin^2(pl),$$

und wenn man die Werte für F und G aus (8c) hierein setzt, so erhält man

$$\left.\begin{aligned} I = \frac{AC\sin k}{\sqrt{C^2\sin^2(pl+k) + m^2g^4\sin^2(pl)}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots (9)$$

Der Zähler dieses Ausdruckes ist unabhängig von der Länge der Saite. Ändert man diese Länge, so kann sich nur der Nenner verändern. Unter dem Wurzelzeichen steht hier die Summe zweier Quadrate, welche nicht Null werden kann, da

die Größen m, g, p, S und daher auch k nicht Null werden können. Der Koeffizient g des Luftwiderstandes ist jedenfalls als eine verschwindend kleine Größe zu betrachten. Es erreicht also der Nenner seinen kleinsten und I seinen größten Wert, wenn

$$\sin(pl + k) = 0$$

oder wenn

$$pl = a\pi - k \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9a)$$

worin a eine beliebige ganze Zahl bedeutet. Der Wert des Maximums von I ist

$$I_M = \frac{AC}{mg^2}.$$

Er ist also unter übrigens gleichen Umständen um so größer, je kleiner g, der Koeffizient des Luftwiderstandes, ist, und je größer C ist. Um übersehen zu können, von welchen Umständen die Größe von C abhängt, setzen wir in die zweite der Gleichungen (8b), wo der Wert von C definiert ist, den Wert von p^2 aus (7a) und setzen außerdem

$$n^2 = \frac{f^2}{M},$$

so ist

$$C^2 = M^2(n^2 - m^2)^2 + S\mu m^2.$$

Die Größe n ist die Zahl der Schwingungen, welche der Steg in 2π Sekunden unter dem Einfluß des elastischen Resonanzbodens allein machen würde, wenn die Saite und der Luftwiderstand wegfiele, m bedeutet dieselbe Zahl von Schwingungen für die Stimmgabel. So kann man den Maximalwert von I nun schreiben:

$$I_M = \frac{A}{g^2}\sqrt{M^2\left\{1 - \frac{n^2}{m^2}\right\}^2 + S\mu},$$

worin alles auf die Gewichte M, S, μ und die Größe des Intervalles $1 - \frac{n}{m}$ zurückgeführt ist.

Wenn $m > n$, was in der Regel der Fall sein wird, so ist es vorteilhaft, das Gewicht des Steges M ziemlich groß zu machen. Ich habe ihn deshalb aus Kupferblech verfertigt. Wenn M sehr groß ist, wird k [nach (8b)] sehr klein und die Gleichung (9a) ergibt dann, daß die verschiedenen Töne stärkster Resonanz sich desto mehr denjenigen Werten nähern, welche der Reihe der einfachen ganzen Zahlen entsprechen. Je schwerer der Steg, desto besser ist die Saite abgegrenzt.

Die hier gegebenen Regeln über den Einfluß des Steges gelten aber zunächst nur für die angegebene Art der Erschütterung durch eine Stimmgabel, nicht für andere Arten, die Saite zu erregen.

Beilage V.

Schwingungsform der Klaviersaiten.

Zu Seite 128 bis 137.

1. Wenn eine gespannte Saite mit einem ganz harten, schmalen Metallstift angeschlagen wird, der augenblicklich wieder zurückspringt, so überträgt der Stoß eine gewisse Geschwindigkeit auf die getroffene Stelle der Saite, während die ganze übrige Saite noch in Ruhe ist. Setzen wir für den Zeitmoment des Stoßes $t = 0$, so können wir die Bewegung der Saite durch die Bedingung bestimmen, daß im

Augenblick des Anschlages die Saite sich noch in ihrer Gleichgewichtslage befindet und nur der getroffene Punkt eine gewisse Geschwindigkeit hat. Man setze also in den Gleichungen (1 c) und (1 d), Beilage III für $t = 0$ auch $y = 0$ und $\frac{dy}{dt} = 0$, letzteres mit Ausnahme des geschlagenen Punktes, dessen x-Koordinate a sei.

Daraus folgt

$$0 = A_1 = A_2 = A_3 \text{ usw.}$$

und die Werte der B werden durch eine ähnliche Integration gefunden wie in (2 b):

$$2\pi n m B_m \int_0^l \sin^2 \frac{m\pi x}{l} dx = \int_0^l \frac{dy}{dt} \cdot \sin \frac{m\pi x}{l} dx$$

$$\pi n m l B_m = c \sin \frac{m\pi a}{l},$$

wo c das Produkt aus der Geschwindigkeit des gestoßenen Teiles der Saite und seiner verschwindend kleinen Länge bezeichnet. Also wird:

$$y = \frac{c}{\pi n l}\left(\frac{\sin \pi a}{l} \frac{\sin \pi x}{l} \sin 2\pi n t + \frac{1}{2} \frac{\sin 2\pi a}{l} \sin \frac{2\pi x}{l} \sin 4\pi n t\right.$$

$$\left. + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi a}{l} \sin \frac{3\pi x}{l} \sin 6\pi n t \text{ usw.}\right)$$

$$B_m = \frac{c}{\pi n l m} \sin \frac{m\pi a}{l} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

Der $m$te Oberton der Saite fällt also auch hier fort, so oft sie in einem Knotenpunkt dieses Tones angeschlagen wird. Übrigens fallen die Obertöne verhältnismäßig noch stärker gegen den Grundton aus, als beim Reißen der Saite, da der Wert von A_m in Gleichung (3) mit m^2, der Wert von B_m aber in Gleichung (10) nur mit m dividiert ist. Das zeigt sich übrigens auch beim Versuch sogleich, wenn man die Saiten mit der scharfen Kante eines metallenen Stäbchens schlägt.

2. Etwas anders werden die Verhältnisse, wenn die Diskontinuität der Bewegung der Saite dadurch vermindert wird, daß die Hämmer mit elastischen Polstern überzogen sind, wie dies beim Pianoforte der Fall ist. Dadurch werden die höheren Obertöne merklich geschwächt, weil die Bewegung nun nicht mehr einem einzelnen Punkt, sondern einem breiteren Stück der Saite mitgeteilt wird, und auch diesem nicht in einem unteilbaren Augenblick, wie es beim Stoß mit einem harten Körper sein würde. Vielmehr gibt das elastische Polster dem ersten Stoß nach und dehnt sich dann wieder, so daß während der Zeit, wo der Hammer der Saite anliegt, sich die Bewegung schon über eine längere Strecke derselben ausdehnen kann. Eine genaue Analyse der Bewegung der Saite nach dem Anschlag eines Klavierhammers würde ziemlich verwickelt sein. Wenn wir aber beachten, daß die Saiten dabei verhältnismäßig wenig von der Stelle rücken, während das weiche elastische Polster der Hämmer sehr nachgiebig ist und bedeutend zusammengepreßt werden kann, so können wir uns für die mathematische Theorie die Vereinfachung erlauben, den Druck des Hammers, welchen er gegen die Saite während des Stoßes ausübt, so groß zu setzen, als er sein würde, wenn der Hammer gegen einen ganz festen und vollkommen unnachgiebigen Körper schlüge. Demnach setzen wir den Druck des Hammers gleich

$$F = K \sin r t$$

für diejenigen Werte der Zeit, wo $0 < t < \frac{\pi}{r}$. Die letztere Größe $\frac{\pi}{r}$ ist die Länge der Zeit, während welcher der Hammer der Saite anliegt. Nachher springt er wieder ab und läßt die Saite frei schwingen. Die Größe r muß desto größer sein, je größer die elastische Kraft des Hammers und je geringer sein Gewicht ist.

Wir müssen nun zunächst die Bewegung der Saite bestimmen während dieses Zeitabschnittes, wo der Hammer ihr anliegt, von $t = 0$ bis $t = \frac{\pi}{r}$. Die Saite wird während dieser Zeit von dem anliegenden Hammer in zwei Teile geteilt, deren Bewegung einzeln bestimmt werden muß. Der Wert von x für die Anschlagsstelle mag x_0 heißen [1]). Die Werte von y für diejenigen Teile der Saite, in denen $x < x_0$, bezeichnen wir mit y_1, und wo $x > x_0$, mit y^1. Im geschlagenen Punkt selbst muß der Druck der Saite gegen den Hammer gleich dem Druck F sein, den dieser ausübt. Der Druck der Saite ist wie in der Gleichung (6a), Beilage IV zu berechnen und wir erhalten daher die Gleichung:

$$F = K \sin r t = S\left(\frac{d y_1}{d x} - \frac{d y^1}{d x}\right) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (11)$$

Von der geschlagenen Stelle gehen nach beiden Saiten Wellen aus. Es wird also y_1 die Form haben müssen:

$$y_1 = \varphi_{(x - x_0 + a t)}$$

für Werte von t, für welche $0 < t < \frac{\pi}{r}$ und $x_0 > x > x_0 - a t$, und

$$y^1 = \varphi_{(x_0 - x + a t)}$$

für dieselben Werte von t und Werte von x, für die $x_0 < x < x_0 + a t$. Wenn wir mit φ' den Differentialquotienten der Funktion φ bezeichnen, folgt aus Gleichung (11)

$$F = K \sin r t = 2 S \varphi'_{(a t)} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (11\,a)$$

Dies nach t integriert gibt

$$C - \frac{K}{r} \cos r t = \frac{2 S}{a} \varphi_{(a t)},$$

und daraus folgt, indem wir die Konstante so bestimmen, daß für $x = x_0 + a t$ y_1 und bzw. y^1 gleich Null werden:

$$y_1 = \frac{a K}{2 r S}\left\{1 - \cos\left[\frac{r}{a}(x - x_0) + r t\right]\right\}$$

$$y^1 = \frac{a K}{2 r S}\left\{1 - \cos\left[\frac{r}{a}(x_0 - x) + r t\right]\right\}.$$

Damit ist die Bewegung der Saite bestimmt für die Zeit, wo $0 < t < \frac{\pi}{r}$, und für den Fall, daß die beiden vorschreitenden Wellen nicht gegen eines der Enden der Saite gestoßen sind. Wäre letzteres der Fall gewesen, so würden sie dort reflektiert worden sein.

---

[1]) [x_0 ist dieselbe Größe wie a auf S. 604 Gl. (2) ff. Hier dagegen bedeutet a, wie auf S. 605 u. 606, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle; a auf S. 612, Zeile 12 von oben bedeutet jede beliebige ganze Zahl.]

Wenn t größer als $\frac{\pi}{r}$ geworden ist, wird F gleich Null, und es folgt dann aus Gleichung (11a), daß von da ab

$$\varphi'_{(at)} = 0, \text{ also } \varphi = Const \text{ für } t > \frac{\pi}{r}.$$

Es bleibt also sowohl y_1 wie y^1 für diejenigen Teile der Saite, über welche die Welle schon fortgeschritten ist, gleich $\frac{aK}{rS}$, bis Teile der Wellen, welche von den Enden reflektiert sind, an die betreffenden Punkte der Saite gelangen.

Um den Einfluß der Enden der Saite in passender Weise in Rechnung zu ziehen, denke man sich die Saite unendlich lang und in allen Punkten, welche um Multipla von $2l$ vom Anschlagspunkt x_0 abstehen, einen ebensolchen Anschlag gleichzeitig mit dem von x_0 stattfindend, so daß von allen diesen Punkten ebensolche Wellen wie von x_0 auslaufen. Ferner denke man sich in denjenigen Punkten, in welchen $x = -x_0 \pm 2al$, gleichzeitig mit dem Anschlag von x_0 einen gleichen Anschlag, aber in entgegengesetzter Richtung, erfolgend, so daß von diesen letzteren Punkten Wellen gleicher Form, aber von negativer Höhe, wie von x_0, auslaufen. Dann werden in den Endpunkten der Saite stets gleiche, aber entgegengesetzte Werte der positiven und negativen Wellen zusammentreffen, diese Endpunkte also vollkommen in Ruhe bleiben, und fur das wirklich existierende Stück der unendlich gedachten Saite zwischen ihren beiden Enden werden alle Bedingungen erfüllt sein, welche zu erfüllen sind.

Von dem Augenblick an, wo der Hammer die Saite verläßt, kann die Bewegung der Saite betrachtet werden als ein Ablaufen der beiden vorwärts (d. h. in Richtung der positiven x) und rückwärts (d. h. in Richtung der negativen x) fortschreitenden Wellensysteme. Von diesen Wellensystemen haben wir aber zunächst nur einzelne abgerissene Stücke gefunden, nämlich die, welche den zunächst den Anschlagspunkten gelegenen Stücken der Saite entsprechen; wir müssen die Wellen noch passend ergänzen, um ein zusammenhängendes vorwärtsschreitendes und ein ebensolches rückwärtsschreitendes System zu erhalten.

Wenn man in Richtung der positiven x auf der Saite fortschreitet, ist der Wert von $y = 0$, ehe man an eine positive rückwärtsschreitende Welle stößt; dann steigt er auf $\frac{aK}{rS}$, welchen Wert er in den positiven Anschlagspunkten hat. Geht man über den Anschlagspunkt hinaus und über die von dort aus vorwärtsschreitende Welle, so findet man wieder Werte von y, die gleich Null sind, und welche bis auf $-\frac{aK}{rS}$ sinken, sobald man die erste negative rückwärtsschreitende Welle überschreitet. Den genannten Wert hat y im ersten negativen Anschlagspunkt. Um nun die positiven und negativen rückwärtsschreitenden Wellen miteinander zu verbinden, muß man sich zwischen jedem positiven und dem nächst folgenden negativen Anschlagspunkt die Größe $+\frac{aK}{rS}$ zu den Werten von y_1 hinzuaddiert denken, so daß die Wellenhöhe diesen Wert, den sie in x_0 schon hat, behält bis zu der Stelle hin, wo die entsprechende negative Welle beginnt. Hier wird also die Wellenhöhe $\frac{aK}{2rS} - y_1$ und sinkt bis Null. Ebenso denke man sich zwischen den negativen Anschlagspunkten

und jedem nächst darauf folgenden positiven Anschlagspunkt $-\frac{aK}{rS}$ zur Wellenhöhe der vorwärtsschreitenden Wellen addiert. Dann sind die rückwärtsschreitenden Wellen überall positiv, die vorwärtsschreitenden überall negativ, und die Wellen sind gleichzeitig so beschaffen, daß sie bei ihrer Fortbewegung diejenige Art der Bewegung erzeugen, welche wir für die Saite gefunden haben, nachdem der Hammer sie verlassen hat.

Wir haben jetzt die Form dieser Wellensysteme als eine Summe einfacher Wellen auszudrücken. Die Wellenlänge ist $2l$, weil sich die gleichartigen Anschlagspunkte in Abständen von $2l$ wiederholen. Nehmen wir die positiven rückwärtsschreitenden Wellen zur Zeit $t = \frac{\pi}{r}$, so ist·

1. von $x = 0$ bis $x = x_0 - \frac{a\pi}{r}$,
$$y_1 = 0;$$
2. von $x = x_0 - \frac{a\pi}{r}$ bis $x = x_0$,
$$y_1 = \frac{aK}{2rS}\left\{1 + cos\left[\frac{r}{a}(x - x_0)\right]\right\};$$
3. von $x = x_0$ bis $x = 2l - x_0 - \frac{a\pi}{r}$,
$$y_1 = \frac{aK}{rS};$$
4. von $x = 2l - x_0 - \frac{a\pi}{r}$ bis $x = 2l - x_0$,
$$y_1 = \frac{aK}{2rS}\left\{1 - cos\left[\frac{r}{a}(2l - x_0 - x)\right]\right\};$$
5. von $x = 2l - x_0$ bis $x = 2l$,
$$y_1 = 0.$$

Setzen wir demnach

$$y_1 = A_0 + A_1 cos\frac{\pi}{l}(x+c) + A_2 cos\frac{2\pi}{l}(x+c) + A_3 cos\frac{3\pi}{l}(x+c) + \text{usw.}$$
$$+ B_1 sin\frac{\pi}{l}(x+c) + B_2 sin\frac{2\pi}{l}(x+c) + B_3 sin\frac{3\pi}{l}(x+c) + \text{usw.} \quad \cdots \quad (12)$$

so ist

$$\int_0^{2l} y\, cos\frac{m\pi}{l}(x+c)\, dx = A_m\, l,$$

$$\int_0^{2l} y\, sin\frac{m\pi}{l}(x+c)\, dx = B_m\, l.$$

Wenn man $c = \frac{a\pi}{2r}$ macht, so werden alle $B = 0$, weil y für $\frac{a\pi}{2r} + \xi$ und $\frac{a\pi}{2r} - \xi$ gleiche Werte hat und man die Grenzen der Integration beliebig wählen kann, wenn sie nur um $2l$ voneinander entfernt sind. Dagegen wird

$$A_m = -\frac{2aKrl^2}{Sm\pi(m^2\pi^2a^2 - r^2l^2)} sin\left(\frac{m\pi}{l}x_0\right) cos\left(\frac{m\pi}{l}\cdot\frac{a\pi}{2r}\right) \quad \cdots \quad (12a)$$

Diese Gleichung gibt die Amplituden A_m der einzelnen Partialtöne des Klanges der geschlagenen Saite. Wenn der Anschlagspunkt ein Knotenpunkt des $m$ten Tones ist, so wird der Faktor $sin\left(\frac{m\pi}{l} x_0\right) = 0$, und es fallen also die Töne aus, in deren einem Knotenpunkt der Anschlag erfolgt ist. Nach dieser Gleichung ist die auf S. 135 gegebene Tabelle berechnet.

Will man die Bewegung der Saite vollständig bestimmen, so ist in der Gleichung (2) für y_1 noch zu setzen $x + at$ für x. Der entsprechende Ausdruck für y^1 wird dann

$$y^1 = -A_0 - A_1 \cos\frac{\pi}{l}(x + at - c) - A_2 \cos\frac{2\pi}{l}(x - at - c) + \text{usw.}$$

und schließlich

$$y = y_1 + y^1 = 2A_1 \cos\frac{\pi}{l} x \cos\frac{\pi}{l}(at + c) + 2A_2 \cos\frac{2\pi}{l} x \cos\frac{2\pi}{l}(at + c) + \text{usw.},$$

womit die Aufgabe gelöst ist.

Wenn man r unendlich groß werden läßt, d. h. den Hammer vollkommen hart, so geht der Ausdruck für A_m der Gleichung (12a) über in den von B_m in Gleichung (10).

Wenn r nicht unendlich ist, so nehmen bei steigender Größe von m die Koeffizienten A_m ab wie $\frac{1}{m^3}$, bei unendlichem r wie $\frac{1}{m}$; bei der gerissenen Saite nahmen sie ab wie $\frac{1}{m^2}$. Es entspricht dies den Theoremen, welche Stokes[1]) über den Einfluß der Diskontinuität einer Funktion, die nach einer Fourierschen Reihe entwickelt wird, auf die Größe der Glieder mit hoher Stellenzahl erwiesen hat. Wenn y die Funktion ist, welche entwickelt werden soll in eine Reihe

$$y = A_0 + A_1 \sin(mx + c_1) + A_2 \sin(2mx + c_2) \text{ usw.},$$

so ist nämlich der Koeffizient A_m für sehr große Werte von m:

1. von der Ordnung $\frac{1}{m}$, wenn y selbst einen plötzlichen Sprung macht;
2. von der Ordnung $\frac{1}{m^2}$, wenn der Differentialquotient $\frac{dy}{dx}$ einen Sprung macht;
3. von der Ordnung $\frac{1}{m^3}$, wenn erst $\frac{d^2y}{dx^2}$ diskontinuierlich ist;
4. höchstens von der Ordnung e^{-m}, wenn alle Differentialquotienten der Funktion und diese selbst kontinuierlich sind.

Daraus folgt denn für die musikalischen Klänge das im Text mehrfach erwähnte Gesetz, daß sie im allgemeinen desto stärkere hohe Obertöne haben, je diskontinuierlicher die entsprechende Bewegung des tönenden Körpers ist.

---

[1]) Cambridge Transactions 8, 533—584.

Beilage VI.

Analyse der Bewegung von Violinsaiten [1]).

Zu Seite 142.

Wir wollen annehmen, daß die Linse des Vibrationsmikroskops horizontale Schwingungen ausführe, und der beobachtete Punkt vertikale, so beobachtet man Schwingungskurven, wie sie in Fig. 23, S. 140 dargestellt sind. Nennen wir die vertikalen Ordinaten y, die horizontalen x, so ist y direkt proportional den Elongationen des schwingenden Punktes, x denen der schwingenden Linse. Letztere macht eine einfache pendelartige Bewegung; ist die Zahl ihrer Schwingungen also n, und t die Zeit, so ist im allgemeinen

$$x = A \sin (2\pi n t + c),$$

wo A und c Konstanten sind.

Wenn nun y auch n Schwingungen macht, so sind x und y beide periodisch und haben dieselbe Dauer der Periode; nach Ablauf jeder einzelnen solchen Periode haben alsdann x und y wieder die gleichen Werte, und der beobachtete Punkt befindet sich alsdann wieder genau an demselben Ort, wo er im Anfang der Periode war. Dies gilt für jeden Punkt der Kurve und für jede neue Wiederholung der schwingenden Bewegung, so daß die Kurve feststehend erscheint.

Denkt man eine Schwingungskurve von der Art, wie sie in den früheren Fig. 5, 6, 7, 8, 9, 10 (S. 33 bis 38) dargestellt sind, und deren horizontale Abszissen der Zeit direkt proportional sind, um einen Zylinder gewickelt, dessen Umfang gleich der Länge einer Periode jener Kurven ist, so daß nun die Zeit t längs des Zylinderumfanges zu messen ist, und nennt man x die Entfernungen von einer durch die Achse des Zylinders gelegten Ebene, so ist auch hier

$$x = A \sin (2\pi n t + c),$$

worin $A \sin c$ den Wert von x für $t = 0$ bedeutet, und A den Radius des Zylinders. Wenn also die auf den Zylinder gezeichnete Kurve von einem unendlich entfernten Auge angesehen wird, welches in der Linie $x = 0$, $y = 0$ sich befindet, so erscheint die Kurve gerade wie im Vibrationsmikroskop.

Haben x und y nicht genau dieselbe Periode, macht z. B. y n Schwingungen, x aber $n + \Delta n$, wo unter Δn eine sehr kleine Größe verstanden ist, so kann man den Ausdruck für x schreiben:

$$x = A \sin [2\pi n t + (c + 2\pi t \Delta n)].$$

Die früher konstante Größe C wächst in diesem Fall langsam. Es bezeichnet aber c den Winkel, welcher zwischen der Ebene $x = 0$ und dem Punkt der Zeichnung liegt, wo $t = 0$ ist. In diesem Fall dreht sich also scheinbar der Zylinder, auf dem man sich die Zeichnung aufgewickelt denkt, um seine Achse.

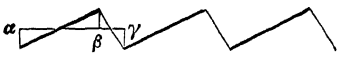
Da eine Größe, welche nach der Periode π periodisch ist, auch betrachtet werden kann als periodisch nach 2π oder 3π oder $a\pi$, wenn a eine beliebige ganze Zahl ist, so passen diese Betrachtungen auch für den Fall, wo die Periode von y ein aliquoter Teil der Periode von x ist, oder umgekehrt, oder beide aliquote Teile derselben dritten Periode sind, d. h. für den Fall, wenn die Töne der Stimmgabel und des beobachteten Körpers in irgend einem konsonanten Verhältnis stehen; nur muß die gemeinsame

[1]) [Vgl. auch Wiss. Abh. 1, 411—419.]

Schwingungsperiode nicht so lang sein, daß während derselben der Lichteindruck im Auge erlöschen könnte.

Aus den beobachteten Kurven [Fig. 23 *B*, *C* und Fig. 24 folgt, daß alle Saitenpunkte abwechselnd auf- und absteigen in der Weise, daß das Aufsteigen mit konstanter Geschwindigkeit geschieht, und das Absteigen ebenso mit einer konstanten Geschwindigkeit, deren Wert aber von der Geschwindigkeit des Aufsteigens verschieden sein kann. Wenn der Bogen in einem Knotenpunkt eines der höhere Obertöne die Saite angreift, so geht in allen Knotenpunkten desselben Tones die Bewegung ganz rein in der beschriebenen Weise vor sich. In anderen Punkten der Saite sind noch kleine Kräuselungen der Schwingungsfigur erkennbar, die aber doch das Bild der beschriebenen Hauptbewegung deutlich erkennen lassen.

Fig. 62.



Rechnen wir die Zeit in Fig. 62 von der Abszisse des Punktes α ab, so daß für α $t = 0$, setzen wir ferner für den Punkt β $t = \mathfrak{T}$, und für den Punkt γ $t = T$, so daß letzteres die Dauer einer ganzen Periode bezeichnet, dann ist der Wert von y zu setzen:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{von } t = 0 \text{ bis } t = \mathfrak{T} & y = ft + h \\ \text{von } t = \mathfrak{T} \text{ bis } t = T & y = g(T - t) + h \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

wobei für $t = \mathfrak{T}$ sich ergibt, daß

$$f\mathfrak{T} = g(T - \mathfrak{T}).$$

Wenn wir nun y in eine Fouriersche Reihe entwickelt denken

$$y = A_1 \sin\frac{2\pi t}{T} + A_2 \sin\frac{4\pi t}{T} + A_3 \sin\frac{6\pi t}{T} \text{ usw.}$$

$$+ B_1 \cos\frac{2\pi t}{T} + B_2 \cos\frac{4\pi t}{T} + B_3 \cos\frac{6\pi t}{T} \text{ usw.},$$

so ergibt sich durch Integration:

$$A_n \int_0^T \sin^2\frac{2n\pi t}{T}\,dt = \int_0^T y \sin\frac{2n\pi t}{T}\,dt$$

$$B_n \int_0^T \cos^2\frac{2n\pi t}{T}\,dt = \int_0^T y \cos\frac{2n\pi t}{T}\,dt,$$

und dies gibt folgende Werte von A_n und B_n:

$$A_n = \frac{(g+f)T}{2n^2\pi^2} \sin\frac{2n\pi\mathfrak{T}}{T}$$

$$B_n = -\frac{(g+f)T}{2n^2\pi^2}\left\{1 - \cos\frac{2n\pi\mathfrak{T}}{T}\right\}$$

und y bekommt die Form

$$y = \frac{(g+f)T}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left\{\frac{1}{n^2} \sin\frac{n\pi\mathfrak{T}}{T} \sin\frac{2\pi n}{T}\left(t - \frac{\mathfrak{T}}{2}\right)\right\} \quad \ldots\ldots (2)$$

In der Gleichung (2) bedeutet y nur die Entfernung eines bestimmten Saitenpunktes von der Gleichgewichtslage. Wenn x die Entfernung dieses Punktes vom

Anfang der Saite bezeichnet, und L die Länge der Saite, so ist die allgemeine Form des Wertes von y, wie in Beilage III, Gleichung (1 b).

$$\left.\begin{aligned} y = &\sum_{n=1}^{n=\infty}\left\{C_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)\sin\frac{2\pi n}{T}\left(t-\frac{\mathfrak{T}}{2}\right)\right\} \\ &+ \sum\left\{D_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)\cos\frac{2\pi n}{T}\left(t-\frac{\mathfrak{T}}{2}\right)\right\} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

Die Vergleichung der Gleichungen (2) und (3) zeigt unmittelbar, daß alle

$$D_n = 0$$

und

$$C_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) = \frac{g+f}{\pi^2}\cdot\frac{T}{n^2}\sin\frac{n\pi\mathfrak{T}}{T} \quad \ldots\ldots\ldots (3a)$$

Hierin sind $g+f$ und $\mathfrak{T}$ abhängig von x, aber nicht von n. Nimmt man die Gleichungen für $n = 1$ und $n = 2$ und dividiert sie durcheinander, so gibt es.

$$\frac{C_2}{C_1}\cos\frac{\pi x}{L} = \frac{1}{4}\cos\frac{\pi\mathfrak{T}}{T}.$$

Daraus folgt für $x = \frac{L}{2}$, wie auch die Beobachtung lehrt, $\mathfrak{T} = \frac{T}{2}$. Wenn aber $x = 0$, so wird nach den Beobachtungen auch $\mathfrak{T} = 0$; es folgt also

$$\left.\begin{aligned} C_2 &= \frac{1}{4}C_1 \\ \frac{x}{L} &= \frac{\mathfrak{T}}{T} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3b)$$

und daraus, daß $g+f$ unabhängig von x sei. Nennen wir p die Amplitude der Schwingung des Saitenpunktes x, so ist

$$f\mathfrak{T} = g(T-\mathfrak{T}) = 2p$$

$$g+f = \frac{2p}{\mathfrak{T}} + \frac{2p}{T-\mathfrak{T}} = \frac{2pT}{\mathfrak{T}(T-\mathfrak{T})} = \frac{2pL^2}{Tx(L-x)}.$$

Und da $g+f$ von x unabhängig ist, muß sein

$$p = 4P\frac{x(L-x)}{L^2},$$

wo P die Amplitude in der Mitte der Saite bezeichnet. Aus der Gleichung (3 b) folgt, daß die Abschnitte $\alpha\beta$ und $\beta\gamma$ der Schwingungsfigur, Fig. 62, sich verhalten müssen, wie die entsprechenden Teile der Saite auf beiden Seiten des beobachteten Punktes. Daraus folgt schließlich

$$y = \frac{8P}{\pi^2}\sum_{n=1}^{n=\infty}\left\{\frac{1}{n^2}\sin\frac{n\pi x}{L}\sin\frac{2\pi n}{T}\left(t-\frac{\mathfrak{T}}{2}\right)\right\} \quad \ldots\ldots\ldots (3c)$$

als vollständiger Ausdruck für die Bewegung der Saite.

Setzt man $t-\frac{\mathfrak{T}}{2} = 0$, so wird y für jeden Wert von x gleich Null, also gehen alle Teile der Saite gleichzeitig durch die Gleichgewichtslage der Saite. Von da ab ist die Geschwindigkeit f des Punktes x

$$f = \frac{2p}{\mathfrak{T}} = \frac{8P(L-x)}{LT}.$$

Diese Geschwindigkeit bleibt aber nur während der Zeit $\mathfrak{T}$:

$$\mathfrak{T} = T\frac{x}{L}$$

bestehen. Nach der Zeit t ist also

$$y = ft = \frac{8P}{LT}\cdot(L-x)t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

solange

$$t < T\frac{x}{L}$$

und also

$$y < \frac{8P}{L^2}x(L-x).$$

Von da ab geht y mit der Geschwindigkeit $g = \frac{2p}{T-\mathfrak{T}} = \frac{8Px}{LT}$ zurück. Es ist also y nach der Zeit $t = \mathfrak{T} + t_1$:

$$y = \frac{8P}{L^2}x(L-x) - \frac{8Px}{LT}t_1.$$

Und da

$$L-x = \frac{T-\mathfrak{T}}{T}L,$$

so ist

$$y = \frac{8Px}{LT}\{T-(\mathfrak{T}+t_1)\}$$

$$= \frac{8Px}{LT}(T-t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4a)$$

Auf dem einen Teil der Saite ist also die Ablenkung gegeben durch die Gleichung (4), auf dem anderen durch (4a). Beide Gleichungen geben für die Gestalt der Saite eine gerade Linie, welche entweder (4) durch den Punkt $x = L$, oder (4a) durch den Punkt $x = 0$ geht. Es sind dies die beiden Endpunkte der Saite. Ihr Schnittpunkt ist gegeben durch die Bedingung

$$y = \frac{8P}{LT}(L-x)t = \frac{8P}{LT}x(T-t).$$

Es muß also sein

$$(L-x)t = x(T-t),$$
$$Lt = xT.$$

Die Abszisse x des Schnittpunktes wächst also proportional der Zeit. Der Schnittpunkt, welcher zugleich der am meisten aus der Gleichgewichtslage entfernte Punkt der Saite ist, rückt also mit konstanter Geschwindigkeit von einem Ende der Saite zum anderen, und während dieser Zeit liegt der Schnittpunkt selbst auf einem parabolischen Bogen, da für ihn

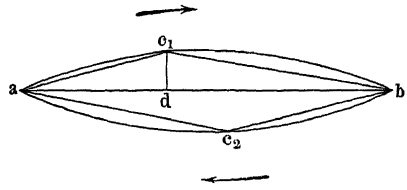
$$y = p = \frac{8P}{L^2}x(L-x).$$

Die Bewegung der Saite läßt sich also kurz so beschreiben, daß in Fig. 63 der Fußpunkt d der Abszisse ihres Gipfels mit konstanter Geschwindigkeit auf der Linie ab hin und her eilt, während der Gipfelpunkt selbst die beiden parabolischen Bögen ac_1b und bc_2a nacheinander durchläuft, und die Saite in den beiden geraden Linien ac_1 und bc_1 oder ac_2 und bc_2 ausgespannt ist.

Die kleinen Kräuselungen der Schwingungsfiguren, welche so oft beobachtet werden, ergeben sich wohl meist daraus, daß diejenigen Töne, welche an der

gestrichenen Stelle oder in deren nächster Nähe Knotenpunkte haben, und deshalb vom Bogen gar nicht oder nur schwach angeregt werden können, gedämpft werden und wegfallen. Wenn der Bogen in einem dem Steg benachbarten Knotenpunkt des $m$ten Obertones streicht, so haben die Schwingungen dieses $m$ten, ferner des $2m$ten, des $3m$ten usw. Tones gar keinen Einfluß auf die Bewegung des vom Bogen berührten Punktes der Saite, und sie können deshalb wegfallen, ohne daß die Wirkung des Bogens auf die Saite geändert wird, und in der Tat erklären sich daraus die beobachteten Kräuselungen der Schwingungsfigur. Was in dem Fall geschieht, wo der Bogen die Saite zwischen je zwei Knotenpunkten angreift, habe ich nicht durch Beobachtung ermitteln können.

Fig. 63.



Beilage VII.

Zur Theorie der Pfeifen.

A. Einfluß der Resonanz in den Zungenpfeifen.

Zu Seite 167.

Für zylindrische Röhren habe ich die Gesetze der Resonanz in meiner „Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden“ [1]) mathematisch entwickelt. Auf die Zungenpfeifen ist namentlich das dort in § 7 behandelte Beispiel anwendbar, wo die Bewegung im Grunde der Röhre als gegeben vorausgesetzt wird. Es sei Vdt das Luftvolumen, welches im Zeitteilchen dt in die Zungenpfeife einströmt, so kann die Größe, da sie periodisch ist, dargestellt werden durch eine Fouriersche Reihe:

$$V = C_0 + C_1 \cos(2\pi nt + T_1) + C_2 \cos(4\pi nt + T_2) + \text{usw.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Die Resonanz ist für die einzelnen Glieder getrennt zu bestimmen, da die den einzelnen Obertönen entsprechenden Schwingungsbewegungen sich ungestört einander superponieren. Wenn wir nun unter l die Länge der Röhre, unter Q ihren Querschnitt, unter $l+\alpha$ die reduzierte Länge der Röhre (die Differenz α ist bei zylindrischen Röhren gleich dem Radius, multipliziert mit $\frac{\pi}{4}$), unter k die Größe $\frac{2\pi}{\lambda}$ (λ die Wellenlänge) verstehen, und wenn wir das Potential der Wellen im freien Raum für den Ton von der Schwingungszahl an gleich

$$\frac{M_a}{r} \cos(akr - 2\pi ant + c)$$

setzen, wo r die Entfernung vom Mittelpunkt der Mündung bezeichnet, so ergeben die in der erwähnten Arbeit entwickelten Gleichungen (15) und (12b), daß

$$M_a = \frac{C_a}{\sqrt{4\pi^2 \cos^2 ak(l+\alpha) + a^4 k^4 Q^2 \sin^2 akl}}.$$

[1]) Journ. f. reine u. angewandte Mathematik 57; Wiss. Abh. 1, 303—382.

Da die Größe $k^2 Q$ immer als sehr klein vorausgesetzt werden muß, wenn unsere Theorie anwendbar sein soll, so wird diese Gleichung für solche Fälle, wo $l + \alpha$ nicht ein ungerades Multiplum einer Viertelwellenlänge ist, nahehin

$$M_a = \frac{C_a}{2\pi \cos a k (l + a)}.$$

Die Resonanz ist also am schwächsten, wenn die reduzierte Länge der Röhre ein gerades Vielfaches einer Viertelwellenlänge ist, und wird desto stärker, je mehr sie sich einem ungeraden Vielfachen derselben Länge nähert. Wenn sie dieses erreicht, ergibt die vollständige Formel

$$M_a = \frac{C_a}{a^2 k^2 Q}.$$

Das Maximum der Resonanz ist also desto größer, je größer die Wellenlänge des betreffenden Tones und je kleiner der Querschnitt ist. Je kleiner der Querschnitt ist, desto enger ist auch die Tonhöhe abgegrenzt, welche starke Resonanz zeigt, während bei größerem Querschnitt die starke Resonanz sich auf einen breiteren Teil der Skala erstreckt.

Für anders geformte Hohlkörper mit engen Mündungen lassen sich ähnliche Gleichungen mittels der in § 10 derselben Abhandlung aufgestellten Sätze gewinnen.

Da die Bedingung starker Resonanz ist, daß $\cos a k (l + \alpha) = 0$ sei, so werden gleichzeitig mit dem Grundton in zylindrischen Röhren (Klarinette) nur die ungeraden Obertöne verstärkt werden.

Im Inneren von kegelförmigen Röhren können wir das Potential der Luftbewegung für den Ton n setzen gleich

$$V = \frac{A}{r} \sin (kr + c) \cos 2\pi nt,$$

wo r die Entfernung von der Spitze des Kegels bezeichnet. Ist eine Zunge in der Entfernung a von der Spitze angebracht, und die Länge der Röhre l, also für das offene Ende $r = l + a$, so können wir als Grenzbedingung für das freie Ende als wenigstens annähernd richtig festsetzen, daß dort der Druck gleich Null sein müsse; dies ist der Fall, wenn

$$\frac{dV}{dt} = -2\pi n \frac{A}{l + a} \sin [k(l + a) + c] \sin (2\pi nt) = 0,$$

also

$$\sin [k(l + a) + c] = 0,$$

und wir können setzen:

$$c = -k(l + a)$$

$$V = \frac{A}{r} \sin k(r - l - a) \cos (2\pi nt).$$

Die stärkste Resonanz findet nun hier, wie bei den zylindrischen Röhren, für diejenigen Töne statt, welche an der Stelle der Zunge das Minimum der Geschwindigkeit haben. Da nämlich bei der Entwickelung der Geschwindigkeit im Mundstück in Gleichung (1) die Koeffizienten C_a einen bestimmten Wert haben, der nur von der Bewegung der Zunge und den davon veranlaßten Luftstößen abhängt, so muß der Koeffizient A der letzten Gleichung desto größer werden, eine je kleinere Geschwindigkeit der entsprechende Wellenzug im Mundstück des Rohres hervorbringt. Um so

größer wird dann die Geschwindigkeit in den anderen Teilen des Rohres. Die Geschwindigkeit der Luftteilchen ist aber:

$$\frac{dV}{dr} = \frac{A}{r^2} \cos 2\pi n t \{kr \cos k(r-l-a) - \sin k(r-l-a)\}.$$

Für das Maximum der Resonanz ist also Bedingung, daß für $r = a$

$$kr = tang\, k(r-l-a)$$

oder

$$ka = -tang\,(kl).$$

Wenn nun die Größe a, d. h. die Entfernung der Zunge von der Spitze des Kegels, sehr klein ist, so ist ka, also auch $tang\, kl$, sehr klein, und es muß $(kl - \mathfrak{a}\pi)$ sehr klein sein, wenn $\mathfrak{a}$ eine gewisse ganze Zahl bedeutet. Dann können wir die Tangente nach Potenzen ihres Bogens entwickeln und erhalten, indem wir uns auf das erste Glied dieser Entwickelung beschränken:

$$ka = \mathfrak{a}\pi - kl$$
$$k(a+l) = \mathfrak{a}\pi,$$

oder, indem wir $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ setzen.

$$a + l = \frac{\mathfrak{a}}{2}\lambda,$$

woraus sich ergibt, daß kegelförmige Röhren alle diejenigen Töne verstärken, für welche die ganze Länge des Kegels, bis zu seiner imaginären Spitze gerechnet, ein Vielfaches der halben Wellenlänge ist; vorausgesetzt, daß die Entfernung der Zunge von dieser imaginären Spitze des Kegels gegen die Wellenlänge verschwindet. Wenn also der Grundton des Klanges durch das Rohr verstärkt wird, werden auch alle seine Obertöne, gerade und ungerade, verstärkt werden bis zu einer Höhe hin, wo die Wellenlängen der Obertöne nicht mehr sehr groß gegen die Entfernung a sind.

Unter übrigens gleichen Umständen wird die Anzahl und Größe der Glieder der Reihe 1, welche die erregende Luftbewegung darstellt, desto größer sein, je vollständiger der eintretende Luftstrom unterbrochen wird. Durchschlagende Zungen müssen deshalb ihrem Rahmen sehr eng anschließen, um einem kräftigen Ton zu geben. Aufschlagende Zungen dagegen, welche vollständigeren Verschluß zustande bringen, sind in dieser Beziehung überlegen. Nach den von Herrn A. Ellis[1]) eingezogenen Informationen haben in der Tat die Orgelbauer sich neuerdings wieder mehr der Anwendung aufschlagender Zungen zugeneigt. Die Zungen werden aber ganz schwach gekrümmt, so daß sie nicht mit einem Male gegen den Rahmen schlagen, sondern sich allmählich an diesem abrollen.

B. Theorie des Anblasens der Pfeifen.

Wenn in der Luftmasse einer Röhre erst einmal longitudinale Wellen erregt sind, so können diese viele Male zwischen beiden Enden hin und her reflektiert werden und periodisch wiederkehrende stehende Schwingungen bilden, ehe sie erlöschen. Am geschlossenen Ende einer gedackten Pfeife wird die Reflexion jedes Wellenzuges eine ziemlich vollständige sein müssen, an den offenen Enden jedoch geht immer ein merklicher Bruchteil der Welle in das Freie hinaus, und die zurückgeworfene Welle ist deshalb nicht ganz so intensiv, wie die ankommende gewesen

[1]) In der englischen Übersetzung dieses Werkes, 2. Aufl., S. 95 u. 96 Anm.

ist; vielmehr nimmt die Intensität der in der Röhre hin und her geworfenen Wellen kontinuierlich ab und sie erlöschen endlich, wenn nicht durch irgend eine anderweitige Einwirkung ihnen bei jedem Hin- und Hergang die verlorene Arbeit ersetzt wird. Was zu ersetzen ist, ist aber der Regel nach nur ein kleiner Teil der ganzen lebendigen Kraft der Wellenbewegung, nur so viel, als bei der Reflexion an den offenen Enden verloren geht. Der verloren gehende Bruchteil der Amplitude am offenen Ende einer zylindrischen Röhre vom inneren Radius R bei einem Ton von der Wellenlänge λ beträgt nach der Theorie

$$\frac{4\pi^2R^2}{\lambda^2},$$

wenn R klein ist im Vergleich zu λ. Bei den von Zamminer untersuchten Röhren wechselte die Wellenlänge λ zwischen $84R$ und $15{,}6R$. Im ersteren Fall wäre der Verlust $\frac{1}{200}$, im letzteren etwa $\frac{1}{8}$ der Amplitude.

Dieser Verlust an lebendiger Kraft kann nun in verschiedener Weise ersetzt werden. Wenn in einen mit Luft unter dem Druck p gefüllten Raum noch das kleine Volumen dV, welches unter dem Druck p_0 stand, hinübergedrängt wird, so ist die dazu nötige Arbeit gleich $(p-p_0)\,dV$. Wenn also während der Schallschwingungen an Orten und zu Zeiten, wo die Luft verdichtet ist, entweder regelmäßig eine kleine Menge Luft hineingedrängt wird, oder durch Erhitzung der Druck der zusammengedrängten Luft gesteigert wird, so erzeugt diese Luftmasse bei ihrer Ausdehnung einen größeren Betrag lebendiger Kraft, als durch ihren Widerstand gegen die Verdichtung bei deren Zustandekommen verloren gegangen ist. Die erstere der beiden Ursachen wirkt in den Zungenpfeifen, letztere in den Röhren der Gasharmonika, wo mit der in das Rohr zurückströmenden Luft auch eine vergrößerte Gasmenge aus dem Gasrohr einströmt und diese dann verbrennend den Druck während der Zeit der Wiederausdehnung steigert.

Die Bedingungen, welche erfüllt sein müssen, damit Zungenpfeifen ansprechen, habe ich in den Verhandlungen des naturhistorisch-medizinischen Vereins zu Heidelberg (26. Juli 1861) gegeben[1]), und ich erlaube mir, die kurze Auseinandersetzung mit einigen Verbesserungen hier wieder abdrucken zu lassen.

I. Das Anblasen der Zungenpfeifen.

Unter Zungenpfeifen verstehe ich alle solche Blasinstrumente, in denen dem Luftstrom der Weg durch einen schwingenden elastischen Körper bald geöffnet, bald verschlossen wird. Die erste Arbeit, welche die Mechanik der Zungenpfeifen zugänglich machte, war die von W. Weber. Er experimentierte aber hauptsächlich mit metallenen Zungen, die wegen ihrer großen Masse und Elastizität nur dann von der Luft kräftig bewegt werden, wenn sich der von der Pfeife angegebene Ton nicht zu sehr von dem Eigenton der freien Zunge unterscheidet. Daher sind die Pfeifen mit metallenen Zungen in der Regel nur fähig, einen einzigen Ton anzugeben, nämlich nur denjenigen unter den theoretisch möglichen Tönen, welcher dem eigenen Ton der Zunge am nächsten liegt.

Anders verhält es sich mit Zungen von leichtem, wenig Widerstand leistendem Material, wie es die Rohrzungen der Klarinette, Oboe, des Fagotts, die menschlichen

[1]) Wiss. Abh. 1, 388—394.

Lippen in den Trompeten, Posaunen, Hörnern sind. Sehr geeignet für die Versuche sind auch membranöse Zungen aus vulkanisiertem Kautschuk, ähnlich den Stimmbändern des Kehlkopfes gestellt; nur muß man sie, damit sie leicht und gut ansprechen, schräg gegen den Luftstrom stellen.

Die Wirkung der Zungen ist wesentlich verschieden, je nachdem die von ihnen geschlossene Öffnung sich öffnet, wenn sich die Zunge dem Winde entgegen nach der Windlade zu bewegt, oder wenn sie sich mit ihm gegen das Ansatzrohr bewegt. Die ersteren nenne ich einschlagende Zungen, die letzteren ausschlagende. Die Zungen der Klarinette, Oboe, des Fagotts, der Zungenwerke der Orgel sind alle einschlagende Zungen. Die menschlichen Lippen in den Blechinstrumenten repräsentieren dagegen ausschlagende Zungen. Die von mir gebrauchten Kautschukzungen kann man einschlagend und ausschlagend stellen.

Die Gesetze für die Tonhöhe der Zungenpfeifen ergeben sich vollständig, wenn man die Bewegung der Zunge unter dem Einfluß des periodisch wechselnden Luftdruckes im Ansatzrohr und Windrohr bestimmt, und berücksichtigt, daß das Maximum der Geschwindigkeit der ausströmenden Luft nur erreicht werden kann, wenn die von der Zunge gedeckte Öffnung ihre größte Weite erreicht hat.

1. Zungen mit zylindrischem Ansatzrohr ohne Windrohr. Die Zunge wird betrachtet als ein Körper, der durch elastische Kräfte in seine Gleichgewichtslage zurückgeführt, und durch den wie der Sinus der Zeit periodisch wechselnden Druck im Ansatzrohr wieder daraus entfernt wird. Die Bewegungsgleichungen[1]) zeigen, daß der Augenblick stärksten Druckes in der Tiefe des Ansatzrohres fallen muß zwischen eine größte Elongation der Zunge nach außen, die ihm voraufgeht, und eine größte Elongation nach innen, welche nachfolgt. Wenn man nun die Schwingungsdauer gleich der Peripherie eines Kreises in 360 Grade abgeteilt denkt, so ist der Winkel ε, um welchen das Maximum des Druckes vor dem Durchgang der Zunge durch ihre Mittellage eintritt, gegeben durch die Gleichung

$$tang\, \varepsilon = \frac{L^2 - \lambda^2}{\beta^2 L \lambda},$$

wo L die Wellenlänge des Tones der freien Zunge in der Luft bezeichnet, λ die des wirklich eingetretenen Tones, und β^2 eine Konstante ist, welche bei Zungen von leichtem Material und größerer Reibung größer ist, als bei schwerem und vollkommen elastischem Material. Der Winkel ε ist zu nehmen zwischen $-\frac{\pi}{2}$ und $+\frac{\pi}{2}$.

In derselben Weise muß nun die Zeit bestimmt werden, um welche der größte Druck in der Tiefe des Ansatzrohres abweicht von der größten Geschwindigkeit, welche letztere wieder zusammenfallen muß mit derjenigen Stellung der Zunge, wo die Öffnung am weitesten ist. Die Berechnung dieser Größe ergibt sich aus meinen Untersuchungen über die Luftbewegung im Inneren eines offenen zylindrischen Rohres[2]). Das Maximum der nach der Mündung gerichteten Geschwindigkeit geht dem Maximum

---

[1]) Ähnlich zu behandeln, wie Seebecks Theorie des Mittönens. Repertorium der Physik 8, 60—64. Siehe auch dieses Werk, Beilage IX, Gleichung 4c. Das dortige ε ist aber das Komplement des obigen zu einem Rechten und statt der Schwingungszahlen sind hier die Wellenlängen gesetzt.

[2]) Journ. f. reine u. angewandte Mathematik 57. Wiss. Abh. 1, 303.

des Druckes voraus um einen Winkel δ (die Schwingungsdauer als Peripherie eines Kreises betrachtet), der gegeben ist durch die Gleichung

$$tang\,\delta = -\frac{\lambda^2}{4\pi Q}\,sin\left[\frac{4\pi(l+a)}{\lambda}\right],$$

worin Q den Querschnitt, l die Länge des Ansatzrohres bezeichnet und a eine von der Form der Öffnung abhängige Konstante, welche bei zylindrischen Röhren, deren Querschnitt den Radius ϱ hat, gleich $\frac{\pi}{4}$ ist. Der Winkel δ ist wieder zwischen $-\frac{\pi}{2}$ und $+\frac{\pi}{2}$ zu nehmen.

Da nun Luft in das Ende des Ansatzrohres nur eintreten kann, wenn die Zunge geöffnet ist, so muß bei einschlagenden Zungen das Maximum der nach außen gerichteten Geschwindigkeit der Luft zusammenfallen mit der größten Elongation der Zunge nach innen, es muß also sein

$$-\varepsilon = \delta + \frac{\pi}{2}$$

und δ sowie ε müssen negativ sein.

Bei ausschlagenden Zungen dagegen muß das Maximum der Luftausströmung zusammenfallen mit der größten Elongation der Zunge nach außen, es muß sein

$$\frac{\pi}{2} = \delta + \varepsilon$$

und δ wie ε müssen positiv sein.

Beide Fälle vereinigen sich in der Gleichung

$$tang\,\varepsilon = cotang\,\delta$$

oder

$$sin\frac{4\pi(l+a)}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda}\,Q\beta^2\cdot\frac{L}{\lambda^2-L^2}\Bigg\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

bei der die Zungen bzw. einschlagen oder ausschlagen müssen, je nachdem die auf beiden Seiten der Gleichung (1) stehenden Größen positiv oder negativ ausfallen.

Da Q und β^2 sehr kleine Größen sind, kann $sin\frac{4\pi(l+a)}{\lambda}$ nur in dem Fall einen erheblichen Wert annehmen, wenn $\lambda^2 - L^2$ sehr klein ist, also der Ton der Pfeife dem der freien Zunge nahe kommt, wie das bei den metallenen Zungen meist der Fall ist. Der Wert von λ bestimmt sich dabei aus der Gleichung (1).

Wenn aber der Unterschied beider Töne $\lambda - L$ groß ist, muß im Gegenteil $sin\frac{4\pi(l+a)}{\lambda}$ sehr klein sein, also nahehin

$$l + a = \mathfrak{a}\,\frac{\lambda}{4},$$

worin $\mathfrak{a}$ eine beliebige ganze Zahl bezeichnet.

Der Druckwechsel in der Tiefe des Ansatzrohres ist nun proportional $sin^2\frac{2\pi(l+a)}{\lambda}$, also ein Minimum, wenn

$$l + a = 2\,\mathfrak{a}\,\frac{\lambda}{4},$$

und ein Maximum, wenn

$$l + a = (2\,\mathfrak{a}+1)\,\frac{\lambda}{4}.$$

Im ersten Fall ist die Kraft des Luftdruckes nicht ausreichend, um die Zunge zu bewegen, im zweiten Fall genügt sie bei nicht zu schweren und widerstehenden Zungen. Daher sprechen gut an die Töne, bei welchen nahehin

$$l + a = (2a + 1)\frac{\lambda}{4},$$

bei denen also die Luftsäule des Ansatzrohres wie die einer gedackten Pfeife schwingt. Gleichzeitig sieht man, daß diese Töne fast unabhängig sind von der eigenen Tonhöhe der Zunge.

Von dieser Art sind die Töne der Klarinette; auch membranöse einschlagende Kautschukzungen an Glasröhren bis zu 16 Fuß Lange sprechen leicht an und lassen verschiedene Obertöne hervorbringen, die der Gleichung (1) gut entsprechen. Ausschlagende Zungen müssen sehr tief gestimmt sein, um reine Töne des Rohres zu geben, daher die menschlichen Lippen dazu geeignet sind, in denen die elastischen Faserzüge mit einer großen Masse wässerigen unelastischen Gewebes belastet sind. Zylindrische Glasröhren können leicht wie Trompeten angeblasen werden und geben die Töne einer gedackten Pfeife. Von diesen sind die höheren, in denen die Differenz $L^2 - \lambda^2$ groß ist, fest anzugeben und rein gestimmt, die unteren dagegen nicht ganz unabhängig vom Werte von L, d. h. der Spannung und Dicke der Lippen, daher unsicher und veränderlich.

2. Zungen mit kegelförmigem Ansatzrohr ohne Windrohr. Es findet ein sehr merkwürdiger Unterschied statt zwischen zylindrischen und kegelförmigen Ansatzröhren. Die Luftbewegung im Inneren der letzteren läßt sich nach denselben Grundsätzen bestimmen, welche ich für die zylindrischen Röhren gebraucht habe. Man setzt innerhalb des Rohres das Potential der Luftbewegung gleich

$$\frac{A}{r}\left\{ \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(R - r + a)\right] \cos(2\pi n t) + \frac{2\pi Q}{\lambda^2} \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(R - r)\right] \sin(2\pi n t),\right.$$

wo r der Abstand von der Spitze des Kegels, R der Wert von r für die Mündung, Q deren Querschnitt, a die Differenz der wahren und reduzierten Länge, n die Schwingungszahl ist. Man erhält hieraus, indem man $\frac{a}{\lambda}$ als sehr klein ansieht und $R - r = l$ setzt:

$$tang\,\delta = -\frac{\lambda^2}{2\pi Q} \sin\frac{2\pi(l+a)}{\lambda} \cdot \left[\cos\frac{2\pi(l+a)}{\lambda} + \frac{\lambda}{2\pi r} \sin\frac{2\pi(l+a)}{\lambda}\right],$$

worin l auf den Ort der Zunge zu beziehen ist. Auch hier ist zu setzen:

$$cotang\,\delta = tang\,\varepsilon.$$

Es interessieren uns hier hauptsächlich die von dem Zungenton stark abweichenden Töne der Pfeife, für welche also $L^2 - \lambda^2$ groß, $tang\,\varepsilon$ daher ebenfalls sehr groß ist, und $tang\,\delta$ sehr klein. Für diese muß also entweder nahehin sein

$$\sin\frac{2\pi(l+a)}{\lambda} = 0,$$

was aber keine Töne gibt, weil hierbei der Druckwechsel in der Tiefe des Ansatzrohres zu schwach ist, oder

$$tang\frac{2\pi(l+a)}{\lambda} = -\frac{2\pi r}{\lambda}\Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Dies ist die Gleichung für die kräftig ansprechenden höheren Töne der Röhre.

Ich gebe hier folgend die Reihe der aus Gleichung (2) berechneten Töne für eine kegelförmige Röhre aus Zink, welche folgende Maße hatte.

Länge $l = 122{,}7$ cm,
Durchmesser der Öffnungen 5,5 und 0,7 cm,
Reduzierte Länge $l + a$, berechnet, 124,77 cm.

Ton	Wellenlänge berechnet	Länge der entsprechenden Pfeife: offenen	Länge der entsprechenden Pfeife: gedackten
1. $H-$	283,61 =	$^2/_1 \cdot 141{,}80$	$= {}^4/_1 \cdot 70{,}90$
2. $h-$	139,83 =	$^2/_2 \cdot 139{,}84$	$= {}^4/_3 \cdot 104{,}88$
3. fis_1	91,81 =	$^2/_3 \cdot 137{,}71$	$= {}^4/_5 \cdot 114{,}76$
4. h_1+	67,94 =	$^2/_4 \cdot 135{,}88$	$= {}^4/_7 \cdot 118{,}89$
5. dis_2	53,76 =	$^2/_5 \cdot 134{,}39$	$= {}^4/_9 \cdot 120{,}95$
6. g_2	44,40 =	$^2/_6 \cdot 133{,}21$	$= {}^4/_{11} \cdot 122{,}11$
7. b_2-	37,79 =	$^2/_7 \cdot 132{,}26$	$= {}^4/_{13} \cdot 122{,}82$
8. c_3	32,87 =	$^2/_8 \cdot 131{,}50$	$= {}^4/_{15} \cdot 123{,}28$
9. d_3	29,22 =	$^2/_9 \cdot 131{,}47$	$= {}^4/_{17} \cdot 124{,}17$

Die Töne vom zweiten bis neunten konnten beobachtet werden und fanden sich vollständig übereinstimmend mit der Rechnung. Man sieht aus den beiden letzten Rubriken, daß die hohen Töne sich fast genau denen einer gedackten Pfeife anschließen, deren Länge der reduzierten Länge der Röhre 124,7 gleich ist; die tieferen schließen sich näher an die einer offenen Pfeife, deren Länge bis zur Spitze des Kegels reichte. Die reduzierte Länge einer solchen wäre $R + a = 142{,}6$ cm. Gewöhnlich werden die Töne der Blechinstrumente den Tönen einer offenen Pfeife gleich gesetzt, aber die oberen sind verhältnismäßig zu hoch[1]) gegen die unteren, in unserem Fall um mehr als einen halben Ton. Bei den Trompeten und Hörnern wird dieser Fehler vielleicht einigermaßen durch den Schallbecher an der Mündung korrigiert. Bei den Posaunen helfen die Auszüge nach.

Während die Trompeten, Posaunen und Hörner zu den Zungenwerken dieser Klasse mit kegelförmigem Rohr und tiefen ausschlagenden Zungen gehören, tragen die Oboen und Fagotte hohe einschlagende Zungen. Sie geben bei der Überblasung ebenfalls die höhere Oktave und dann die Duodezime, wie eine offene Pfeife. Die Rechnung nach Gleichung (2) stimmt für die Oboe sehr gut mit Zamminers Messungen.

II. Das Anblasen der Flötenpfeifen.

In meiner Abhandlung über diskontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen (Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom 23. April 1868[2]) habe ich die mechanischen Eigentümlichkeiten solcher Bewegungen beschrieben und aus der Theorie abgeleitet, wie sie der (auf S. 154 beschriebene) blattförmige Luftstrom an der Mündung einer angeblasenen Orgelpfeife ausführt. Die Grenzflächen

[1]) [Die engl. Übersetzung (S. 393) macht auf einen Fehler des Originals aufmerksam. In der vorl. Aufl. ist dementsprechend eine Korrektur angebracht.]

[2]) Wiss. Abh. 1, 146.

dieser Schicht, welche die in die Mundöffnung der Pfeife ein- und ausströmende Luftmasse quer durchbricht, sind als Wirbelflächen zu betrachten, d. h. als Flächen, die mit einer kontinuierlichen Schicht von Wirbelfäden belegt sind. Solche Flächen haben ein sehr leicht störbares Gleichgewicht. Eine ebene Fläche dieser Art, gleichmäßig mit parallelen geraden Wirbelfäden bedeckt, von unendlicher Ausdehnung könnte bestehen; wo aber die geringste Ausbiegung erst einmal eingetreten ist, rollt sie sich in immer enger sich zusammenziehende Spiralwindungen auf, welche immer weiter greifende Teile der Fläche in ihren Wirbel hineinziehen.

Diese Neigung der Trennungsflächen diskontinuierlich bewegter Luftmassen, sich in Wirbel aufzulösen, sieht man sehr deutlich auch an zylindrischen Luftströmen, die aus zylindrischen Röhren herausgetrieben werden und denen etwas Rauch zugemischt ist, um sie sichtbar zu machen. In vollkommen ruhiger Luft können sie unter günstigen Umständen einen bis drei Fuß lang werden. Bei dem geringsten Geräusch aber zucken sie zusammen, indem sie sich schon nahe an ihrem Ursprung in Wirbel auflösen. Eine große Menge von Erscheinungen dieser Art hat Herr Tyndall auch an brennenden Gasstrahlen beobachtet und beschrieben[1]).

Diese Auflösung in Wirbel findet an dem Luftblatt der Pfeifenmündungen da statt, wo es gegen die Lippe der Pfeife schlägt. Von dieser Stelle ab löst es sich in Wirbel auf, wobei es sich mit der umgebenden oszillierenden Luft der Pfeife mischt. Je nachdem es ein- oder auswärts strömt, verstärkt es deren nach innen oder nach außen gerichtete Geschwindigkeit und wirkt also wie eine beschleunigende Kraft von periodisch wechselnder entgegengesetzter Richtung, die sehr schnell von der einen nach der anderen Seite umschlägt. Den transversalen Oszillationen der umgebenden Luftmasse folgt ein solches Luftblatt ohne erheblichen Widerstand. Während der Phase des Einströmens der Luft in die Mündung der Pfeife wird auch das Luftblatt einwärts gerichtet und verstärkt nun seinerseits wieder die lebendige Kraft des Einströmens. Umgekehrt während des Ausströmens[2]).

Wenn man die beschleunigende Kraft des Luftstromes durch eine Fouriersche Reihe dargestellt denkt, so werden nach dem (auf S. 57) erwähnten Gesetz die Amplituden der einzelnen Glieder von der Ordnungszahl m im allgemeinen abnehmen wie $\frac{1}{m}$. In der Tat braucht man nur den in Beilage III, Gleichung (1b) und (3) gegebenen Ausdruck für die Elongation y einer gezupften Saite zu benutzen, um für die Zeit $t = 0$ den Wert von $\frac{dy}{dx}$ zu bilden, so bekommt man die Reihe, welche den periodischen Wechsel zwischen einem höheren und einem niederen Werte des y ausdrückt, wie ihn Fig. 19 (auf S. 94) darstellt.

Aus meinem oben zitierten Aufsatz über die Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden ergibt sich, daß überall in der Röhre eine positive Komponente des

[1]) J. Tyndall: „On Sound". Deutsche Übersetzung, Braunschweig 1874, S. 274—292. — Derselbe im „Philosophical Magazine" Ser. IV, Vol. XXXIII, p. 92—99 und 375—391.

[2]) Die Bildung dieses Luftblattes und seines Schwingens ist von den Herren Schneebeli (Pogg. Ann. 153, 301), Sonreck (ebenda 158, 129) und Hermann Smith (English Mechanic January 1867; Nature 8, 25, 45, 383; 9, 301; 10, 161, 481; 11, 325) beschrieben, auch hat schon der erstgenannte die mechanische Erklärung für die wesentlichen Züge dieses Vorganges gegeben.

Druckes zusammenfällt mit dem Maximum der gegen die Öffnung gekehrten Geschwindigkeit, welche mit dieser Geschwindigkeit multipliziert den Wert hat:

$$\frac{aA^2k^2Q}{2\pi}.$$

Hierin bezeichnet:

a die Schallgeschwindigkeit,
A das Maximum der Geschwindigkeit am Ende der Röhre,
Q den Querschnitt des zylindrischen Teiles der Röhre,
$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ und λ die Wellenlänge.

Wenn nun von irgend einem Querschnitt der Röhre zwei Wellenzüge nach beiden Enden hin gehen, die in jenem Querschnitt übereinstimmende Geschwindigkeit haben, so muß jene Druckkomponente in beiden Wellenzügen entgegengesetzt gerichtet sein. Das gilt für die Anblasestelle, auch wenn sie in der Tat dem einen Ende des Rohres ganz nahe rückt, so daß der eine Wellenzug verschwindend kleine Länge bekommt. Unter diesen Umständen muß die durch die eingeblasenen Luftmassen hervorgerufene Beschleunigung jenem Druckunterschied zweimal genommen entsprechen. Da in der Öffnung selbst A die Geschwindigkeit ist, so ist jener Druckunterschied doppelt genommen für den $m$ten Ton

$$\frac{aA_m\,2\pi Qm^2}{\lambda^2}.$$

Dies würde der einzige Druckunterschied sein, wenn der angeblasene Ton genau dem Eigenton der Röhre entspräche. Dies ist aber mit dem Mechanismus des Anblasens, wie sich zeigen läßt, nicht zu vereinigen, und es fehlt immer eine Länge β zwischen den beiden Wellenzügen, die eingeschaltet werden müßte, um sie zu einem zusammenhängenden Zuge stehender Schwingungen zu machen. In diesem Fall kommt noch ein Druckunterschied hinzu gleich

$$-aA_m \sin\left(\frac{2\pi m\beta}{\lambda}\right).$$

Für die kleineren Ordnungszahlen wird man den Sinus durch den Bogen ersetzen und dieses letztere Glied als das größere betrachten dürfen. Demgemäß werden die niederen Partialtöne des Klanges dann den Koeffizienten mA_m wie $\frac{1}{m}$ zunehmen lassen, d. h. A_m wie $\frac{1}{m^2}$, die höheren dagegen A_m wie $\frac{1}{m^3}$. Die Geschwindigkeiten der Partialschwingungen in entfernteren Teilen des freien Raumes draußen haben den Faktor k einmal mehr [siehe Gleichungen (12g) und (12h) meiner Abhandlung] als die Geschwindigkeiten in der Röhre. Diese werden also für die niederen Werte von m wie $\frac{1}{m}$ abnehmen, was auch für die Geschwindigkeiten der Violinsaiten der Fall ist, die höheren aber nehmen ab wie $\frac{1}{m^2}$. Je größer Q, der Querschnitt der Röhre, desto eher wird diese stärkere Abnahme der hohen Töne eintreten. Es sind deshalb auch hauptsächlich die engeren metallischen Pfeifen, deren Klänge die Orgelbauer mit dem der Violine und des Cello vergleichen.

Die Umstände, welche auf den Mechanismus des Anblasens und den Wert der Größe β Einfluß haben, erfordern eine weitläufigere Erörterung. Ich hoffe letztere bald an einem anderen Ort geben zu können.

Beilage VIII.

Praktische Anweisungen für die Versuche über Zusammensetzung der Vokale.

Zu Seite 199.

Um starke Schwingungen der Gabeln zu erhalten, ist es notwendig, daß die Schwingungszahlen mit der größten Genauigkeit den einfachen arithmetischen Verhältnissen entsprechen. Nachdem die Gabeln zuerst vom Verfertiger nach dem Gehör und einem Klavier so genau gestimmt worden sind, als es auf diesem Wege zu erreichen ist, erreicht man die erforderliche größere Genauigkeit mittels der elektrischen Ströme selbst. Man verbindet zuerst die Unterbrechungsgabel (Fig. 33, S. 198) mit der dem Grundton entsprechenden, und verschiebt an ersterer die bewegliche Klemme, bis man zwischen beiden genauen Einklang hergestellt hat, wobei die Stärke des Grundtones ein Maximum erreicht, dessen Existenz sich sowohl für das Auge wie für das Ohr leicht zu erkennen gibt. Die Schwingungen dieser tiefsten Gabel sind nämlich so stark, daß ihre Breite am Ende der Zinken unter günstigen Umständen 2 bis 3 mm beträgt Auch ist zu bemerken, daß, wenn der Einklang nahehin aber nicht vollkommen hergestellt ist, und man die elektrischen Ströme zuerst anfangen läßt, auf die Gabel zu wirken, man einige Schwebungen der letzteren hört und sieht, die freilich verschwinden, wenn sie in vollen Gang gekommen ist.

Nachdem zwischen der Unterbrechungsgabel und der des Grundtones Einklang hergestellt ist, schaltet man die übrigen Gabeln mit geöffneten Resonanzröhren nacheinander in die Leitung ein, und stimmt sie ab, bis sie unter dem Einfluß der intermittierenden Ströme das Maximum der Tonstärke geben. Das Stimmen geschieht zuerst durch die Feile. Höher macht man die Gabeln bekanntlich dadurch, daß man von den Enden der Zinken etwas abnimmt, tiefer, indem man die Wurzel der Zinken dünner macht. Beides muß aber an beiden Zinken möglichst gleichmäßig geschehen. Um zu ermitteln, ob die Gabel zu hoch oder zu tief ist, klebt man an die Enden der Zinken ein wenig Wachs, wodurch die Gabel tiefer wird, und beobachtet, ob dadurch der Ton schwächer oder stärker wird. Im ersteren Fall ist sie zu tief, im zweiten Fall zu hoch. Da Änderungen der Temperatur und vielleicht auch andere Umstände einen kleinen Einfluß auf die Stimmung der Gabeln haben, so habe ich vorgezogen, die höheren Gabeln alle durch Feilen ein weniges zu hoch zu machen, und durch kleine Mengen von Wachs, die auf die Enden der Zinken geklebt werden, die richtige Stimmung herzustellen. Die Menge des Wachses kann leicht beliebig geändert werden, und dadurch werden kleine zufällige Veränderungen der Stimmung ausgeglichen.

Für die Resonanzröhren ist eine so genaue Stimmung nicht nötig, wenn sie angeblasen denselben Ton geben wie die Gabeln, ist die Stimmung genügend. Sind sie zu tief, so kann man geschmolzenes Wachs hineingießen und sie dadurch höher machen. Sind sie zu hoch, so muß man die Öffnung etwas kleiner machen.

Einige Mühe hat es mir gemacht, das Geräusch des Funkens an der Unterbrechungsstelle zu beseitigen. Zunächst schaltete ich einen großen Kondensator aus Stanniolplatten ein, wie solche bei den großen elektromagnetischen Induktionsapparaten gebraucht werden. Dadurch wird der Funken aber immer nur bis auf ein gewisses Maß verringert. Vergrößerung des Kondensators zeigte sich nicht mehr von Nutzen. Die Platten des Kondensators sind durch Blätter von dünnem gefirnißten Papier ge-

trennt, die eine mit der Unterbrechungsgabel verbunden, die andere mit dem Quecksilbernäpfchen, in welches deren Ende eintaucht. Nach manchen vergeblichen Versuchen fand ich endlich, daß Einschaltung eines sehr langen und sehr dünnen Drahtes zwischen den beiden Enden der Leitung an der Unterbrechungsstelle das Geräusch des Funkens fast ganz beseitigt, ohne doch der Wirkung des Stromes auf die Gabeln zu schaden. Der so eingeschaltete Draht muß einen so großen Widerstand haben, daß er den der Drahtwindungen in sämtlichen Elektromagneten zusammengenommen bei weitem übertrifft. Dann geht kein in Betracht kommender Teil des Stromes durch diesen Draht. Erst wenn die Leitung geöffnet wird und der dünne Draht die einzige Schließung für den Extrakurrent der Elektromagnete bildet, entladet sich dieser durch ihn. Damit nun aber der dünne Draht selbst keinen Extrakurrent erzeugt, darf er nicht in Windungen um eine Rolle gelegt sein, sondern muß auf einem Brette hin und her gehend ausgespannt sein, so daß zwei zunächst benachbarte Strecken des Drahtes von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchlaufen werden. Zu dem Ende habe ich an die beiden Enden eines Brettchens (1 Fuß lang) zwei Kämme von harter Kautschukmasse angeschraubt und einen dünnen versilberten Kupferdraht, wie er zum Überspinnen seidener Fäden gebraucht wird, zwischen den Zähnen dieser Kämme hin und her gezogen (90 mal). Dadurch bringt man eine lange Strecke (90 Fuß) dieses Drahtes gut isoliert in einen verhältnismäßig engen Raum zusammen, und so, daß er keinen in Betracht kommenden Extrakurrent gibt. Wenn in dem Draht nämlich bei der Unterbrechung des Stromes ein Extrakurrent gebildet würde, so würde dieser in dem aus den Elektromagneten und dem dünnen Draht gebildeten Kreise die entgegengesetzte Richtung haben, als der Extrakurrent in den Elektromagneten, und letzterer würde ganz oder teilweise verhindert werden, sich durch den dünnen Draht zu entladen.

Zur Bewegung der Gabeln brauchte ich zwei bis drei Grovesche Elemente. Die Elektromagnete waren in zwei Reihen nebeneinander gestellt. Die ganze Anordnung ist in Fig. 64 schematisch dargestellt. Die Ziffern 1 bis 8 bezeichnen die Resonanzröhren der Stimmgabeln, die gestrichelten Linien, welche nach m_1 bis m_8 hingehen, die Fäden, welche die Deckel von der Öffnung der Resonanzröhren hinwegziehen. a_1 bis a_8 sind die Elektromagnete, welche die zwischen ihren Schenkeln stehenden Stimmgabeln in Bewegung setzen; b ist die Unterbrechungsgabel, f der zugehörige Elektromagnet. Die Lage von beiden ist etwas verändert, um den Zusammenhang der Stromleitungen deutlicher zu machen. Die Elemente der galvanischen Batterie sind mit e_1 und e_2 bezeichnet, der große Drahtwiderstand mit dd, der Kondensator, dessen spiralig aufgerollte Platten nur im Querschnitt gesehen werden, mit c.

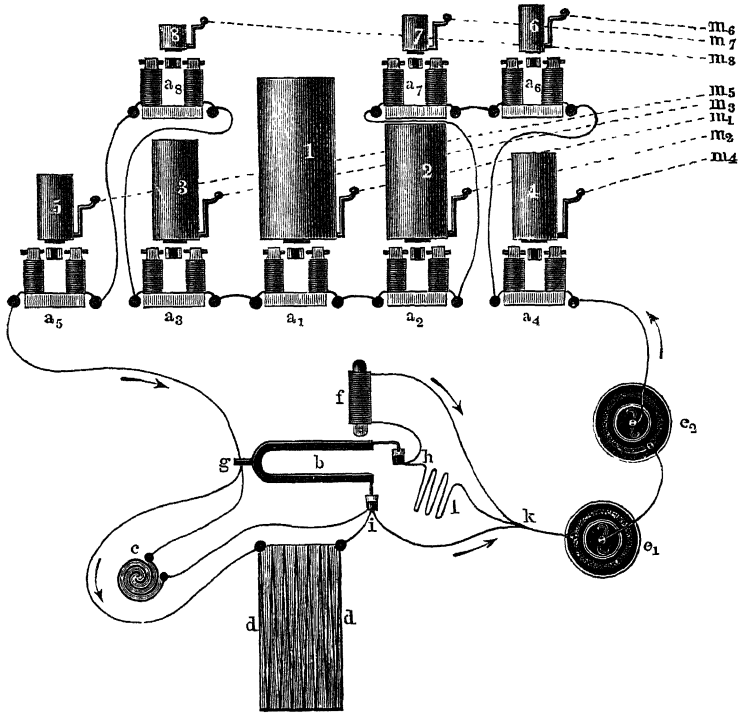
Die Leitung des elektrischen Stromes geht von e_2 der Reihe nach durch sämtliche Elektromagnete der Stimmgabeln bis zum Stiel der Unterbrechungsgabel g. Zuweilen ist es vorteilhafter, diesen Teil der Leitung so anzuordnen, daß er in zwei parallele Zweige geteilt wird, und die drei höheren, schwer zu bewegenden Gabeln in den einen Zweig eingeschaltet werden, die fünf tieferen in den anderen, so daß die drei höheren von einem stärkeren Strom durchflossen werden, als die tieferen.

Der Rest der Leitung von g bis zum zweiten Pol der Batterie in e_1 enthält den Unterbrechungsapparat, welcher hier so angeordnet ist, daß jede Schwingung der Gabel zweimal den Strom herstellt, indem einmal die obere Zinke in das Quecksilber des Näpfchens h einschlägt, das andere Mal die untere Zinke in das Näpfchen i. Wird bei h geschlossen, so geht der Strom von g durch die obere Zinke der Gabel nach h, dann durch den Elektromagneten der Gabel f nach k und e_1. Zwischen h

und *k* ist es meist nötig, noch einen Seitenzweig *hlk* einzuschalten, von mäßigem Widerstand, um den Strom im Elektromagneten *f* so zu schwächen, daß die Gabel *b* nicht zu heftige Schwingungen macht. Die Zickzackbiegungen bei *l* stellen diesen Zweig dar.

Schlagen die Zinken der Gabel auseinander, so wird der Strom bei *h* geöffnet und nach kurzer Unterbrechung wieder bei *i* geschlossen, so daß er nun von *g* durch die untere Zinke der Gabel nach *i*, von da über *k* zur Batterie e_1 gelangt. Im Moment der Unterbrechung des Stromes bei *h* oder bei *i* entstehen durch die Induktion

Fig. 64.



in den acht Elektromagneten der Stimmgabel kräftige Extrakurrents, welche glänzende und lärmende Funken an den Unterbrechungsstellen geben würden, wenn nicht die herandrängenden Elektrizitätsmassen sich zum Teil in den Kondensator *c* für den Moment aufspeichern, zum Teil durch den sehr großen Widerstand *dd* entladen könnten.

Der letztere stellt, wie man sieht, eine dauernde Verbindung zwischen *g* und der Batterie her, aber er leitet so schlecht, daß kein namhafter Teil des Stromes durch ihn gehen kann, ausgenommen, wenn im Moment der Stromesöffnung die große elektromotorische Kraft der Extrakurrents entsteht.

Die hier beschriebene Anordnung ist zu wählen, wenn die Gabel 1 die höhere Oktave der Gabel *b* ist. Macht dagegen erstere nur ebensoviel Schwingungen wie *b*, so nimmt man den Draht *ik* fort und leitet die beiden anderen in *i* endenden Drähte nach *h*.

Sollen einzelne Gabeln aus der Leitung ausgeschaltet werden, so werden zu dem Ende kurze Nebenschließungen der Drahtrollen ihrer Elektromagnete geschlossen. In Fig. 32, S. 196 ist die Einrichtung dazu gezeichnet. Die Metallknöpfe *hh* sind leitend mit den Schraubenklemmen *g* verbunden, in denen der Draht des Elektromagneten endigt. Wird der Hebel *i* herabbewegt, so schiebt er sich mit einiger Reibung auf den vorderen Knopf *h* und stellt so eine gut leitende Nebenschließung für den Draht des Elektromagneten her, was zur Folge hat, daß der elektrische Strom hauptsächlich über *hh* sich entladet und nur ein verschwindend kleiner Teil durch den viel längeren Weg um den Elektromagneten herumkreist.

Was die Theorie der Bewegung der Gabeln betrifft, so ist zunächst klar, daß die Stärke des Stromes in den Elektromagneten eine periodische Funktion der Zeit sein muß. Die Dauer der Periode ist gleich der Periode einer Schwingung der Unterbrechungsgabel *b*. Die Zahl der Unterbrechungen in der Sekunde sei *n*. Dann wird die Stärke des Stromes in den Elektromagneten, und somit auch die Größe der Kraft, welche die Elektromagnete auf die Gabeln ausüben, von der Form sein:

$$A_0 + A_1 \cos(2\pi nt + c_1) + A_2 \cos(4\pi nt + c_2) + A_3 \cos(6\pi nt + c_3) + \text{usw.}$$

Das allgemeine Glied dieser Reihe, $A_m \cos(2\pi mnt + c_m)$, wird geeignet sein, die Gabel von *mn* Schwingungen in der Sekunde in Bewegung zu setzen, während es auf Gabeln von anderer Stimmung wenig einwirkt.

Beilage IX.

Phasen der durch Resonanz entstandenen Wellen.

Zu Seite 202.

Es sei eine Stimmgabel der Mündung einer Resonanzröhre genähert und das Ohr des Hörenden befinde sich in einer gegen die Dimensionen der Öffnung sehr großen Entfernung von der Röhre. Ich habe bewiesen[1]), daß, wenn ein tönender Punkt sich im Punkt *B* eines teilweise von festen Wänden begrenzten, teilweise unbegrenzten Raumes befindet, die Schallbewegung in einem anderen Punkt *A* desselben Raumes der Intensität und Phase nach dieselbe ist, als sie in *B* sein würde, wenn sich der tönende Punkt in *A* befände. *B* sei der Ort der Stimmgabel (oder genauer des Endes einer ihrer Zinken), *A* der des Ohres. Die Bewegung der Luft, welche eintritt, wenn sich die Stimmgabel nahe vor der Öffnung befindet, läßt sich nicht wohl bestimmen, wohl aber habe ich (S 47 und 48 der zitierten Abhandlung) die Bewegung bestimmt für den Fall, wo die Stimmgabel in großer Entfernung ist. Denken wir uns also die Gabel an den Ort des Ohres nach *A* gebracht, so haben wir die Schallbewegung an dem Punkt *B* nahe der Mündung zu bestimmen. Diese Schallbewegung ist aus zwei Teilen zusammengesetzt, der eine Teil, dessen Potential dort mit Φ bezeichnet ist, entspricht der Bewegung, welche auch bei geschlossener Mündung der Resonanzröhre vorhanden sein würde, und ist in dem vorliegenden Fall zu klein, um wahrgenommen zu werden; der andere Teil, mit Ψ bezeichnet, hat nach

---

[1]) Journ. f. reine u. angewandte Mathematik 57, 1—72. Wiss. Abh. 1, 303—382. Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden. § 5.

den dort angewendeten Bezeichnungen im freien Raum und in einiger Entfernung von der Öffnung den Wert [S. 38, Gleichung (12h)]:

$$\psi = -\frac{AQ}{2\pi\varrho} \cdot \cos(k\varrho - 2\pi nt) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

(Q der Querschnitt der Röhre, ϱ die Entfernung vom Mittelpunkt ihrer Öffnung, n die Schwingungszahl, $\frac{2\pi}{k}$ die Wellenlänge). Die Bewegung in unendlich kleiner Entfernung r vom tönenden Punkt A ist gegeben durch die Gleichung:

$$\Phi = H \cdot \frac{\cos[2\pi nt - c]}{r} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

und es ist, wenn wir unter r_1 die Entfernung des imaginären tönenden Punktes A vom Mittelpunkt der Röhrenmündung verstehen, nach (16c) und (13a) der zitierten Abhandlung:

$$-tang(kr_1 + c) = tang \cdot \tau_2 = -\frac{k^2 Q \sin kl \cos k\alpha}{2\pi \cos k(l+\alpha)} \quad \ldots\ldots \quad (2a)$$

(l Länge der Röhre, α eine Konstante, die von der Form ihrer Mündung abhängt) und endlich ist (16c, 13a) die dort I genannte Größe:

$$I = K\frac{2k\sin(kl)}{r_1} \pm AQ\frac{k^2 \sin(kl)}{2\pi \sin\tau_2},$$

woraus folgt:

$$A = \pm H \cdot \frac{4\pi \sin\tau_2}{kQr_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Das $\pm$-Zeichen werde so bestimmt, daß die Konstanten A und H gleiches Zeichen bekommen, dann muß τ_2 zwischen 0 und π liegen.

Hier ist die Stärke der Resonanz A ausgedrückt durch die Intensität des tönenden Punktes H, den Querschnitt der Resonanzröhre Q, die Entfernung r_1 des tönenden Punktes von deren Mündung und die Größe τ_2. Der Phasenunterschied zwischen den Punkten A und B ist nach Gleichung (1), (2) und (2a):

$$\pi - k\varrho + c = \pi - k\varrho - kr_1 - \tau_2.$$

Die Größe $k\varrho$ kann aber bei den Entfernungen des Punktes B von der Mitte der Öffnung, die wir anwenden können, als verschwindend klein betrachtet werden, so daß bei der Schwächung des Tones, die wir durch Entfernung der Stimmgabel von der Mündung der Röhre erreichen, die Phase nicht merklich geändert wird. Wenn wir dagegen die Stimmung der Röhre verändern, so wird in dem Ausdruck für die Phase nur die Größe τ_2, welche von kl nach Gleichung (2a) abhängig ist, geändert, und dem entspricht immer auch eine Änderung in der Stärke der Resonanz, da in deren Ausdruck in Gleichung (3) $\sin\tau_2$ als Faktor vorkommt. Die stärkste Resonanz tritt ein, wenn $\sin\tau_2 = 1$, also $\tau_2 = \frac{\pi}{4}$. Nennen wir dies Maximum der Resonanz $\mathfrak{A}$, so ist

$$\mathfrak{A} = \frac{4\pi H}{kQr_1},$$

und für andere Abstimmungen der Röhre, falls deren Querschnitt nicht geändert wird,

$$\sin\tau_2 = \frac{A}{\mathfrak{A}}.$$

Ob der Winkel τ_2 kleiner oder größer als ein Rechter zu nehmen ist, bestimmt sich danach, ob in Gleichung (2a) der Wert von

$$tang\,\tau_2 = -\frac{k^2 Q \sin kl \cos k\alpha}{2\pi \cos k(l+\alpha)}$$

positiv oder negativ ist. Da nun k, Q und $\cos k\alpha$ stets positiv sind, so hängt der Wert von $tang\,\tau_2$ ab von dem Faktor $\frac{\sin kl}{\cos k(l+\alpha)}$. Wenn $\cos k(l+\alpha) = 0$, findet Maximum der Resonanz statt; wenn $\sin kl = 0$, ein Minimum. Es ist also $\tau_2 < \frac{\pi}{2}$, wenn man durch Verlängerung der Röhre sich einem Minimum der Resonanz nähert, dagegen $\tau_2 > \frac{\pi}{2}$, wenn man sich einem Maximum nähert. Bei den Anwendungen ist die Röhre immer nahe einem Maximum der Resonanz, und also $\tau_2 < \frac{\pi}{2}$, wenn die Röhre zu tief, und $\tau_2 > \frac{\pi}{2}$, wenn die Röhre zu hoch gestimmt ist.

Macht man durch Verstimmung der Röhre $A^2 = {}^1/_2\,\mathfrak{A}^2$, so ist die Veränderung der Schwingungsphase $= \frac{\pi}{4}$. So kann man also die eingetretene Veränderung der Phase immer nach der Veränderung in der Stärke der Resonanz wenigstens abschätzen.

Ein ähnliches Gesetz findet statt für die Phasen der schwingenden Stimmgabeln, verglichen mit denen des erregenden Stromes. Um die Betrachtung zu vereinfachen, will ich hier nur einen einzelnen schwingenden Massenpunkt betrachten, der durch eine elastische Kraft immer wieder in seine Gleichgewichtslage zurückgeführt wird. Wenn x die Entfernung des Massenpunktes aus seiner Gleichgewichtslage ist, sei $-a^2 x$ die elastische Kraft. Es wirke ferner eine periodische Kraft ein, wie sie in unseren Versuchen durch die elektrischen Ströme hervorgebracht wird, deren Größe $A \sin nt$ sei, und eine die Schwingungen dämpfende Kraft, deren Größe der Geschwindigkeit proportional ist, also gleich $-b^2 \frac{dx}{dt}$. Eine solche entsteht bei unseren Versuchen teils durch die Reibung und den Luftwiderstand, namentlich aber durch die von der bewegten Stimmgabel induzierten Ströme, welche am meisten dazu beiragen, die Schwingungen zu dämpfen. Ist m die Masse des schwingenden Punktes, so ist also

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -a^2x - b^2\frac{dx}{dt} + A\sin nt \quad \ldots \quad \ldots \quad (4)$$

Das vollständige Integral dieser Gleichung ist

$$x = \frac{A\sin\varepsilon}{b^2 n}\sin(nt-\varepsilon) + Be^{-\frac{b^2 t}{2m}}\sin\left\{\frac{t}{m}\sqrt{a^2 m - {}^1/_4 b^4} + c\right\} \quad \ldots \quad (4a)$$

worin

$$tang\,\varepsilon = +\frac{b^2 n}{a^2 - mn^2} \quad \ldots \quad \ldots \quad (4b)$$

Das mit B multiplizierte Glied in der Gleichung (4a) ist nur im Anfang der Bewegung von Einfluß; wegen des Faktors $e^{-\frac{b^2 t}{2m}}$ wird es bei wachsender Zeit t immer kleiner und kleiner, so daß es schließlich verschwindet. Seine Existenz im

Anfang der Bewegung ist aber schuld daran, daß die in Beilage VIII erwähnten vorübergehenden Schwebungen entstehen, wenn die Größe n wenig verschieden ist von

$$\frac{1}{m}\sqrt{a^2 m - {}^1/_4 b^2}.$$

Das mit A multiplizierte Glied der Gleichung (4a) entspricht dagegen der dauernden Schwingung des Massenpunktes. Die lebendige Kraft i^2 dieser Bewegung ist gleich dem Maximalwert von ${}^1/_2 m\left(\frac{dx}{dt}\right)^2$, nämlich:

$$i^2 = \frac{mA^2 \sin^2 \varepsilon}{2b^4} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Wenn man nun die Tonhöhe des erregenden Tones, d. h. n sich verändern läßt, so erreicht i^2 seinen Maximalwert, den wir mit I^2 bezeichnen wollen, wenn

$$\sin^2 \varepsilon = 1 \quad \text{oder} \quad \operatorname{tang} \varepsilon = \pm \infty,$$

wobei

$$I^2 = \frac{mA^2}{2b^4}.$$

Wir können deshalb auch schreiben.

$$i^2 = I^2 \sin^2 \varepsilon \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5a)$$

Dieselbe Größe ε bestimmt also in Gleichung (4a) den Phasenunterschied zwischen den periodisch wechselnden Elongationen x der Masse und den wechselnden Werten der Kraft, sowie in Gleichung (5a) die Stärke der Resonanz.

Die Bedingung, daß $\operatorname{tang} \varepsilon = \pm \infty$ sei, wird nach (4b) erfüllt, wenn

$$a^2 = mn^2.$$

Bezeichnen wir also den Wert von n, welcher dem Maximum des Mitschwingens entspricht, mit N, so ist

$$N^2 = \frac{a^2}{m} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5b)$$

Dieser Ton stärkster Resonanz ist gleich dem Ton, welchen der betreffende Massenpunkt geben würde, wenn er nur unter dem Einfluß der elastischen Kraft ohne Reibung und ohne fremde Erregung in Schwingung gesetzt wäre. Davon ist etwas verschieden der Eigenton des Körpers, den er unter Einfluß der Reibung und des Luftwiderstandes gibt, dessen Tonhöhe ν in dem zweiten Glied der Gleichung (4a) gegeben ist:

$$\nu = \frac{1}{m}\sqrt{a^2 m - {}^1/_4 b^2}.$$

Erst wenn $b = 0$ gesetzt wird, d. h. Reibung und Luftwiderstand verschwinden, wird

$$\nu^2 = \frac{a^2}{m} = N^2.$$

Nun ist in allen praktischen Fällen, wo wir das Phänomen des Mitschwingens beobachten, b verschwindend klein, so daß der Unterschied zwischen dem Ton stärkster Resonanz und dem Eigenton der schwingenden Körper vernachlässigt werden kann, wie dies auch im Text geschehen ist. Es wird unter Einführung der Größe N die Gleichung (4b)

$$\operatorname{tang} \varepsilon = \frac{b^2 n}{m(N^2 - n^2)} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4c)$$

Wegen der auf S. 248 erörterten Frage, wie die Membrana basilaris des Ohres bei Geräuschen bewegt wird, interessiert uns noch das Integral einer Gleichung, in welcher an Stelle des $A \sin(nt)$ der Gleichung (4) eine willkürliche Funktion der Zeit ψ_t tritt. Man kann eine solche allerdings, wenn sie für sehr große positive und negative Werte der Zeit gleich Null wird, mittels des Fourierschen Integrals auch in eine Summe (Integral) von Gliedern $A \sin(nt + c)$ verwandeln, und dann für jedes einzelne dieser Glieder die eben gefundene Lösung anwenden und schließlich wieder die Summe aller dieser Lösungen bilden. Aber diese Form der Lösung wird unübersichtlich, weil sie eine kontinuierliche Reihe von Tönen anzeigt, deren jeder von $t = -\infty$ bis $t = +\infty$ besteht. Wir müssen also einen anderen Weg einschlagen.

Die zu integrierende Differentialgleichung ist:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + b^2\frac{dx}{dt} + a^2x = \psi \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

worin x die gesuchte, ψ die gegebene Funktion der Zeit ist, letztere für jeden Wert von t als endlich vorausgesetzt.

Setze

$$y + xi = A\int_{-\infty}^{t} \psi_s \cdot e^{\varkappa(t-s)} \cdot ds \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

worin $\varkappa$ eine Wurzel der Gleichung bezeichnet:

$$m\varkappa^2 + b^2\varkappa + a^2 = 0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (6a)$$

d. h.

$$\varkappa = -\frac{b^2}{2m} \pm i\sqrt{\frac{a^2}{m} - \frac{b^4}{4m^2}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (6b)$$

was wir bezeichnen wollen als

$$\varkappa = -\alpha + \beta i,$$

indem wir den Koeffizienten der Dämpfung als klein genug annehmen, daß die Wurzelgröße, die wir mit β bezeichnet haben, reell sei.

Es ist alsdann, wenn ψ eine kontinuierliche Funktion ist,

$$\frac{d}{dt}(y + xi) = A\varkappa\int_{-\infty}^{t} \psi_s \cdot e^{\varkappa(t-s)} \cdot ds + A\psi_t \qquad \cdots\cdots\cdots (6c)$$

$$\frac{d^2}{dt^2}(y + xi) = A\varkappa^2\int_{-\infty}^{t} \psi_s \cdot e^{\varkappa(t-s)}\, ds + A\varkappa\psi_t + A\frac{d\psi}{dt} \qquad \cdots\cdots (6d)$$

Multipliziert man (6) mit a^2, (6c) mit b^2, (6d) mit m und addiert, so erhält man mit Berücksichtigung von (6a) folgende Gleichung zwischen den imaginären Teilen der betreffenden Ausdrücke:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + b^2\frac{dx}{dt} + a^2x = mA\beta\psi_t.$$

Setzen wir also

$$A = \frac{1}{\beta m},$$

so ergibt Gleichung (6) einen Wert von x, der der Differentialgleichung (5) genügt und für jeden Wert der Zeit endlich ist, nämlich

$$x = \frac{1}{\beta m}\int_{-\infty}^{t} \psi_s \cdot e^{-\alpha(t-s)} \cdot \sin\beta(t-s) \cdot ds.$$

Das heißt, x erscheint als eine Summe von superponierten erlöschenden Oszillationen, deren Anfangszeit s und deren Anfangsamplitude der Wert $\frac{\psi_s}{\beta m}$ ist; und zwar gibt jeder dem Augenblick t vorausgegangene Augenblick seinen Beitrag. Dieser Beitrag verschwindet aber für diejenigen Teile der Bewegung, welche längere Zeit vor dem betrachteten Augenblick erregt worden sind, d. h. für die, bei denen der Exponent $\alpha(t-s)$ eine große Zahl ist, und die Bewegung hängt also in jedem Augenblick nur ab von denjenigen Kräften ψ, die kurz vorher eingewirkt haben.

Findet die Einwirkung der Kraft ψ nur während einer begrenzten Zeit von t_0 bis t_1 statt, so wird das x der Gleichung (6d) erst bis zur Zeit t_0 gleich Null sein, dann von Null verschieden werden, und nach t_1 wird die Bewegung die einfach erlöschender Schwingungen. Übrigens wird die Größe von x davon abhängen, wie oft große positive Werte von ψ mit großen positiven von $\sin(\beta t)$ zusammentreffen und negative mit negativen. Der Wert von x wird verhältnismäßig am größten werden, wenn ψ und $\sin(\beta t)$ ihr Zeichen nahehin gleichzeitig wechseln.

Hat ψ_t von der Zeit $t = t_0$ zur Zeit $t = t_1$ einen konstanten Wert p gehabt, so wird

$$x = He^{-\alpha(t-t_1)} \sin[\beta(t-t_1) + \varepsilon - \eta],$$

wenn man setzt

$$k \cos\eta = -\alpha$$

$$k \sin\eta = \beta;$$

ferner

$$H \cos\varepsilon = \frac{p}{\beta m k}\left\{1 - e^{-\alpha(t_1-t_0)} \cos\beta(t_1-t_0)\right\}$$

$$H \sin\varepsilon = \frac{p}{\beta m k} e^{-\alpha(t_1-t_0)} . \sin\beta(t_1-t_0).$$

Wählt man für k den positiven Wert von $\sqrt{\alpha^2+\beta^2}$, so wird η ein stumpfer Winkel. Gibt man dem H das Vorzeichen des Druckes p, so hat der zwischen $+\frac{\pi}{2}$ und $-\frac{\pi}{2}$ zu nehmende Winkel ε dasselbe Vorzeichen wie $\sin\beta(t_1-t_0)$. Der Ausdruck für x stellt dann erlöschende Schwingungen dar, deren Anfangsamplitude, wenn wir die Dauer der Einwirkung $t_1 - t_0 = \tau$ setzen, den Wert hat

$$H = \frac{p}{\beta m k}\sqrt{1 - 2e^{-\alpha\tau}\cos\beta\tau + e^{-2\alpha\tau}}.$$

Dies ist für verschiedene Werte von τ ein Maximum, wenn $\cos(\beta\tau+\eta) = \cos\eta . e^{-\alpha\tau}$, oder für kleine Werte von α und τ, wenn $\beta\tau$ annähernd eine ungerade Anzahl halber Schwingungsperioden des Eigentones umfaßt; für eine gerade Anzahl solcher Perioden dagegen ist H ein Minimum.

Nach lange fortgesetzter Einwirkung der Kraft p aber verschwinden die Exponentialfunktionen und H bekommt den konstanten Wert

$$H_\infty = \frac{p}{\beta m k}.$$

Für sehr kleine Werte von τ dagegen können die Anfangsmaxima für $\beta\tau = \pi$ den Wert erreichen

$$H_0 = \frac{p}{\beta m k}(1 + e^{-\alpha\tau}).$$

Wenn der Druck p sein Zeichen wechselt, so oft $cos(\beta\tau)$ es tut, so wird die Amplitude H nach n solchen Zeichenwechseln

$$H = \frac{p}{\beta m k}(1 + e^{-\alpha\tau})[1 + e^{-\alpha\tau} + e^{-2\alpha\tau} + \text{usw.} + e^{-n\alpha\tau}]$$

oder

$$H = \frac{p}{\beta m k}\frac{1 + e^{-\alpha\tau}}{1 - e^{-\alpha\tau}}[1 - e^{-(n+1)\alpha\tau}].$$

Dieser Ausdruck zeigt die mit jedem Zeichenwechsel wachsende Verstärkung an, welche bei Übereinstimmung der Periode des Druckwechsels mit der Periode des Eigentones eintritt. Der Nenner $(1 - e^{-\alpha\tau})$ gibt die Größe der Dämpfung während einer halben Schwingungsperiode. Wenn diese sehr klein ist, so wird H schließlich sehr groß, endlich nach unendlich vielen Wiederholungen

$$H = \frac{H_n}{1 - e^{-\alpha\tau}}.$$

Beilage X.

Beziehung zwischen der Stärke des Mitschwingens und der Dauer des Ausschwingens.

Zu Seite 233.

Wir können die in der Beilage IX gebrauchten Bezeichnungen für die Bewegung einer Masse, die durch eine elastische Kraft in ihre Gleichgewichtslage zurückgeführt wird, beibehalten. Wenn eine solche Masse durch eine äußere periodische Kraft erschüttert wird, ist ihre Bewegung in Gleichung (4a) gegeben. Setzen wir die Intensität A dieser Kraft gleich Null, so reduziert sich die Gleichung (4a) auf

$$x = Be^{-\frac{b^2 t}{2m}} sin(\nu t + c),$$

worin

$$\nu = \frac{1}{m}\sqrt{a^2 m - {}^1/_4 b^2}.$$

Der Wert für x wird wegen des Faktors, welcher t im Exponenten enthält, immer kleiner und kleiner. Messen wir t, wie es im Text geschehen ist, nach der Zahl der Schwingungen des Tones stärkster Resonanz, und setzen wir zu dem Ende

$$T = \frac{N}{2\pi}t$$

$$\beta = \frac{\pi b^2}{Nm} = \pi\left(\frac{N}{n} - \frac{n}{N}\right) tang\ \varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

Wenn wir die lebendige Kraft der Schwingungen zur Zeit $t = 0$ mit L bezeichnen, und zur Zeit t mit l, so ist

$$L = B^2\nu^2$$

$$l = B^2\nu^2 e^{-2\beta T},$$

also

$$\frac{l}{L} = e^{-2\beta T}$$

und

$$T = \frac{1}{2\beta} log\ nat\left(\frac{L}{l}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6a)$$

In der Tabelle auf S. 234 ist $L:l = 10:1$ gesetzt worden, und daraus der Wert von T berechnet, nachdem vorher vermittelst der Gleichung (6) der Wert von β bestimmt war. In Gleichung (6) aber ist $sin^2\varepsilon = {}^1/_{10}$ gesetzt worden, entsprechend der Bedingung, daß die Tonstärke des mitschwingenden Körpers ${}^1/_{10}$ ihres Maximums betragen solle, und für das Verhältnis $N:n$ sind die Zahlenverhältnisse gesetzt worden, welche den in der ersten Spalte der Tabelle angegebenen Intervallen entsprechen. So ist der Wert von β berechnet worden.

Die Gleichung (4b) der Beilage IX können wir schreiben:

$$tang\,\varepsilon = \frac{b^2}{mN\left(\frac{N}{n} - \frac{n}{N}\right)} = \frac{\beta}{\pi\left(\frac{N}{n} - \frac{n}{N}\right)}.$$

In dieser Gleichung können N, welches die Tonhöhe der stärksten Resonanz angibt, b^2, welches die Stärke der Reibung bestimmt, und die Masse m für verschiedene Cortische Fasern verschieden sein. Man muß also bei der Anwendung auf das Ohr b^2 und m als Funktionen von N betrachten. Da nun der Grad der Rauhigkeit der engeren dissonierenden Zusammenklänge bei gleichen Intervallen durch die ganze Skala hin ziemlich derselbe ist, so muß die Größe $tang\,\varepsilon$ für gleiche Werte von $\frac{N}{n}$ nahehin dieselben Werte annehmen, und daher die Größe $\frac{b^2}{mN} = \frac{\beta}{\pi}$ ziemlich unabhängig vom Wert von N sein; Genaueres läßt sich darüber freilich nicht bestimmen. Es ist deshalb auch in den später folgenden Rechnungen β als unabhängig von N betrachtet worden.

Beilage XI.

Schwingungen der Membrana basilaris der Schnecke.

Zu Seite 239.

Das mechanische Problem, auf dessen Lösung es hier ankommt, ist zu untersuchen, ob eine zusammenhängende Membran von ähnlichen Eigenschaften, wie die Membrana basilaris der Schnecke, so schwingen kann, wie es Herr Hensen für letztere vorausgesetzt hat; so nämlich, daß jedes Faserbündel der Membran auf einen seiner Länge und Spannung entsprechenden Ton mitschwinge, ohne daß die benachbarten Fasern merklich in Bewegung gesetzt würden. Wir können bei dieser Untersuchung abstrahieren von der spiraligen Krümmung der Basilarmembran der Schnecke, und uns dieselbe gerade ausgespannt denken zwischen den Schenkeln eines Winkels, dessen Größe wir mit 2η bezeichnen. Die Halbierungslinie desselben möge die Achse der x sein, und rechtwinkelig dagegen die Achse der y durch den Scheitel des Winkels gelegt sein. Die Spannung der Membran parallel der x-Achse möge gleich P, dagegen parallel der y-Achse gleich Q sein, beide gemessen durch die Kräfte, welche auf die der Längeneinheit gleichen, den x und y bzw. parallelen Seiten eines Quadrats ausgeübt werden müssen, um der Spannung der Membran das Gleichgewicht zu halten. Die Masse eines solchen Quadrats sei μ, ferner t die Zeit und z die Ausweichung eines Membranpunktes von der Gleichgewichtslage desselben. Ferner sei Z eine äußere Kraft, welche in Richtung der positiven z auf die Membran wirkt und

diese in Schwingung versetzt. Die Bewegungsgleichung der Membran, wie sie aus dem Hamiltonschen Prinzip nach dem Vorgang von Kirchhoff ohne prinzipielle Schwierigkeit entwickelt werden kann, ist alsdann:

$$Z + P\frac{d^2 z}{dx^2} + Q\frac{d^2 z}{dy^2} = \mu\frac{d^2 z}{dt^2} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Die Grenzbedingungen sind:

1. daß $z = 0$ sei längs der Schenkel des Winkels, also wo $y = \pm x\, tang\, \eta$,
2. daß $z = 0$ sei für $x = y = 0$, d. h. im Scheitel des Winkels,
3. daß z endlich sei für unendlich große Werte von x.

In welcher Weise statt dieser beiden letzteren Grenzbedingungen, welche für unseren Zweck genügen, auch gewisse bestimmte Kurven als feste Grenzen zwischen den Schenkeln des Winkels 2η eingeführt werden können, wird die weitere Entwickelung lehren.

Die Gleichung (1) kann auf eine bekanntere Form gebracht werden, wenn wir setzen:

$$x = \xi\sqrt{P} \quad \text{und} \quad y = v\sqrt{Q}.$$

Wir erhalten dann

$$Z + \frac{d^2 z}{d\xi^2} + \frac{d^2 z}{dv^2} = \mu\frac{d^2 z}{dt^2} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1a)$$

welches die Bewegungsgleichung für eine nach allen Richtungen gleichmäßig gespannte Membran ist, in deren Fläche ξ und v die rechtwinkeligen Koordinaten sind.

Die Grenzbedingungen werden bei dieser Bezeichnung:

1. daß $z = 0$ für
$$v = \pm\xi\sqrt{\frac{P}{Q}} \cdot tang\, \eta,$$
2. daß $z = 0$ für $\xi = v = 0$,
3. daß z endlich sei für $\xi = \infty$.

Die transformierte Aufgabe unterscheidet sich also von der ursprünglichen nur dadurch, daß die transformierte Membran gleichmäßig gespannt und in einem Winkel von anderer Größe (die wir mit 2ε bezeichnen wollen) ausgespannt ist.

Da bei der von uns beabsichtigten Anwendung P sehr klein gegen Q genommen werden wird, so wird auch dieser Winkel ε, den die transformierte Membran ausfüllt, sehr klein, ein Umstand, in welchem wesentlich die analytischen Schwierigkeiten der Aufgabe begründet sind.

Nach diesen Vorbemerkungen führen wir zur analytischen Behandlung der Gleichungen (1) oder (1a) Polarkoordinaten ein, indem wir setzen:

$$\left.\begin{aligned} x &= \xi\sqrt{P} = r\sqrt{P}\,.\,cos\,\omega \\ y &= v\sqrt{Q} = r\sqrt{Q}\,.\,sin\,\omega \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1b)$$

Die Gleichungen (1) und (1a) bekommen dadurch folgende Gestalt:

$$\frac{d^2 z}{dr^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{dz}{dr} + \frac{1}{r^2}\cdot\frac{d^2 z}{d\omega^2} = \mu\frac{d^2 z}{dt^2} - Z \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1c)$$

Die Grenzbedingungen sind, daß

1. $z = 0$ für $\omega = \pm\varepsilon$, wobei

$$tang\, \varepsilon = \sqrt{\frac{P}{Q}}\, tang\, \eta$$

2. $z = 0$ für $r = 0$,

3. z endlich, wenn r unendlich.

Was die Natur der Kraft Z anbetrifft, so nehmen wir an, daß sie einen Teil habe, der von der Reibung herrührt, und den wir gleich $-\nu \frac{dz}{dt}$ setzen dürfen, worin ν eine positive reelle Konstante bezeichnet. Zweitens, daß das umgebende Medium einen periodisch veränderlichen Druck auf die Membran ausübe, und zwar gleichmäßig über die ganze Fläche der Membran. Somit setzen wir

$$Z = -\nu \frac{dz}{dt} + A \cos(nt)$$

und erhalten folgende Bewegungsgleichung

$$\frac{d^2z}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dz}{dr} + \frac{1}{r^2}\frac{d^2z}{d\omega^2} = \mu \frac{d^2z}{dt^2} + \nu \frac{dz}{dt} - A\cos(nt) \quad \ldots\ldots (2)$$

Von den möglichen Bewegungen, welche die Membran unter diesen Umständen ausführen kann, interessieren uns hier nur diejenigen, welche dauernd durch die dauernd wirkende periodische Kraft unterhalten werden, und die selbst derselben Periode folgen müssen. Setzen wir dementsprechend

$$z = \zeta e^{int} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2a)$$

wo

$$i = \sqrt{-1},$$

und bestimmen ζ durch die Gleichung

$$\frac{d^2\zeta}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\zeta}{dr} + \frac{1}{r^2}\frac{d^2\zeta}{d\omega^2} + (\mu n^2 - in\nu)\zeta = -A \quad \ldots\ldots (2b)$$

so wird der reelle Teil des Wertes von z der Gleichung (2) genügen und einer gleichmäßig andauernden Oszillation der Membran entsprechen.

Nachdem auf diese Weise die Variable t aus der Differentialgleichung beseitigt ist, kann dasselbe auch mit Berücksichtigung der ersten Grenzbedingung für ω geschehen, indem wir ζ sowohl, wie die Konstante A, in eine nach Kosinus der ungeraden Vielfachen des Winkels $\frac{\pi\omega}{2\varepsilon} = h\omega$ fortschreitende Reihe verwandeln. Bekanntlich ist innerhalb der Grenzen $h\omega = +\frac{\pi}{2}$ und $-\frac{\pi}{2}$

$$A = \frac{4A}{\pi}\left\{\cos(h\omega) - \frac{1}{3}\cos(3h\omega) + \frac{1}{5}\cos(5h\omega) \text{ usw.} \quad \ldots\ldots (3)\right.$$

Setzen wir dementsprechend

$$\zeta = s_1\cos(h\omega) - \frac{1}{3}s_3\cos(3h\omega) + \frac{1}{5}s_5\cos(5h\omega) \text{ usw.} \quad \ldots\ldots (3a)$$

so muß für jedes dieser s_m sein

$$\frac{d^2s_m}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{ds_m}{dr} + \left(\mu n^2 - in\nu - \frac{m^2h^2}{r^2}\right)s_m = -\frac{4A}{\pi}\Bigg\} \quad \ldots\ldots (3b)$$

und da die erste unserer Grenzbedingungen durch die Gleichung (3a) erfüllt ist, wenn die Reihe überhaupt konvergiert, so bleiben nur die Bedingungen übrig, daß

1. $s_m = 0$ für $r = 0$,

2. s_m endlich für $r = \infty$.

Daß jedes s_m durch diese Bedingungen vollständig bestimmt ist, zeigt sich leicht. Denn gäbe es zwei verschiedene Funktionen, welche der Gleichung (3b) und den beiden Grenzbedingungen genügten, so würde ihre Differenz, die wir mit σ bezeichnen wollen, den Bedingungen genügen:

$$\frac{d^2\sigma}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{d\sigma}{dr}+\left(\mu n^2-in\nu-\frac{m^2h^2}{r^2}\right)\sigma=0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3c)$$

also eine Besselsche Funktion sein, und gleichzeitig würde

1. $\sigma = 0$ für $r = 0$,

2. σ endlich sein für $r = \infty$.

Beides zusammen ist nicht möglich für Besselsche Funktionen, bei denen das ν einen noch so wenig von Null verschiedenen Wert hat. Nur wenn $\nu = 0$ ist, d. h. gar keine Reibung besteht, ist die gegebene Bestimmung ungenügend. Dann können nämlich einmal eingeleitete Oszillationen unendliche Zeit fortbestehen, auch wenn keine Kraft da ist, die ihnen neue Anstöße gibt.

Partikuläre Integrale der Gleichung (3b) lassen sich in Form von Reihen leicht entwickeln, ähnlich wie die Reihen für die verwandten Besselschen Funktionen, welche der Gleichung (3c) genügen. Die eine dieser Reihen läuft nach ganzen Potenzen von r fort und ist immer konvergent. Aber wenn der Winkel ε sehr klein ist, wird die Zahl der Glieder dieser Reihe, die zur Bestimmung des Wertes von s nötig ist, sehr groß, und die Reihe selbst deshalb unbrauchbar zur Diskussion des Ganges der Funktion. — Eine zweite Reihe, die nach negativen Potenzen von r fortläuft und ein anderes partikuläres Integral gibt, ist semikonvergent, und nur wenn h eine gerade ganze Zahl ist, eine algebraische Funktion. Im letzteren Fall wird dagegen die erstgenannte Reihe in ihren einzelnen Gliedern unendlich.

Für den vorliegenden Zweck ist es daher zweckmäßiger, den gesuchten Ausdruck für s in Form von bestimmten Integralen zu bilden.

Man bezeichne mit φ und ψ folgende beiden Integrale:

$$\left.\begin{aligned}\psi &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-ix r \sin t}\sin(mht)\,dt \\ \varphi &= \int_1^{\infty} u^{-mh-1}\, e^{-\frac{ixr}{2}\left(u+\frac{1}{u}\right)}\,du\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

worin

$$x = \sqrt{\mu n^2 - in\nu} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4a)$$

und das Vorzeichen der Wurzel so gewählt ist, daß der reelle Teil von ix positiv wird.

Es ist alsdann

$$s_m = \frac{4A}{\pi x^2}\left[mh\,.\,\psi + mh\,.\,\varphi\,.\cos\left(\frac{mh\pi}{2}\right)-1\right] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4b)$$

der gesuchte Ausdruck für s_m.

Daß der in (4b) gegebene Ausdruck die Gleichung (3b) erfüllt, ergibt sich, wenn man ersteren in letztere substituiert und bei der Differentiation unter den Integralzeichen von ψ und φ darauf achtet, durch partielle Integration die unter dem Integralzeichen auftretenden Faktoren $\cos t$ bzw. $\left(u-\frac{1}{u}\right)$ fortzuschaffen.

Für $r = 0$ wird

$$\psi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(mht)\,dt = \frac{1}{mh}\left\{1 - \cos\frac{mh\pi}{2}\right\}$$

$$\varphi = \int_1^{\infty} \frac{du}{u^{mh+1}} = \frac{1}{mh},$$

also

$$s_m = 0.$$

Für $r = \infty$ wird $\varphi = \psi = 0$, also

$$s_m = -\frac{4A}{\pi x^2}.$$

Die Funktion s_m entspricht also auch den beiden für sie gestellten Grenzbedingungen, von denen oben gezeigt ist, daß sie zu ihrer Bestimmung ausreichen.

Mittels der Gleichung (4b) können wir nun untersuchen, wie der Wert von s_m ausfällt, wenn P, die Spannung der Membran in Richtung der x, verschwindend klein wird. Es wird dann, wie aus den Gleichungen (1b) folgt, r unendlich groß; ebenso h, dessen Wert ist

$$h = \frac{\pi\sqrt{Q}}{2\sqrt{P}\,tang\,\eta}.$$

Setzen wir aber

$$r = h\varrho,$$

so wird ϱ eine endliche Größe, nämlich

$$\varrho = \frac{2x\,.\,tang\,\eta}{\pi\sqrt{Q}}.$$

Es ist leicht zu sehen, daß unter diesen Umständen $mh\varphi$ gleich Null wird. Wir können es nämlich schreiben:

$$mh\varphi = \int_1^{\infty} mh\,.\,e^{-mh\log u - (l-i\lambda)\frac{h\varrho}{2}\left(u+\frac{1}{u}\right)}\,.\,\frac{du}{u} \Bigg\} \quad \ldots\ldots (5)$$

wo gesetzt ist

$$ix = l - i\lambda$$

und l nach der oben gemachten Voraussetzung positiv ist. Da innerhalb der ganzen Ausdehnung der Integration $u > 1$ und also $\log u > 0$, so ist überall in der gleichen Ausdehnung der reelle Teil des Exponenten negativ und enthält den unendlich großen Faktor h. Folglich verschwindet jeder Teil des Integrals, und somit auch der ganze Wert $h\varphi$.

In dem Integral ψ dagegen

$$\psi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{-(l-i\lambda)\,.\,h\varrho\,.\,\sin t}\sin(mht)\,.\,dt$$

wird der reelle Teil des Exponenten zwar auch negativ unendlich für alle diejenigen Teile des Integrals, für welche t nicht verschwindend klein ist, und alle diese werden

also gleich Null. Das ist aber nicht der Fall mit denjenigen Teilen des Integrals, für welche t verschwindet.

Man kann deshalb für ein unendlich großes h den obigen Ausdruck für ψ ersetzen durch folgenden:

$$\psi = \int_0^\infty e^{-(l-i\lambda)\cdot h\varrho t} \cdot \sin(mht)\, dt.$$

In diesem letzteren läßt sich die Integration ausführen und ergibt

$$\psi = \frac{m}{h[(l-i\lambda)^2\varrho^2 + m^2]} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5a)$$

und

$$s_m = \frac{4A\varrho^2}{\pi[m^2 - \varrho^2\varkappa^2]}$$

oder mit Berücksichtigung von (4a)

$$s_m = \frac{4A\varrho^2}{\pi[m^2 - \varrho^2\mu n^2 + i\varrho^2 n\nu]} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5b)$$

Oder wenn wir, um die Hilfsgröße ϱ aus diesen Ausdrücken zu entfernen, mit $\frac{\beta}{2}$ den Wert von y an der Grenze der Membran bezeichnen, so ist

also

$$\frac{\beta}{2} = x\, tang.\, \eta,$$

$$\varrho = \frac{\beta}{\pi\sqrt{Q}}$$

$$S_m{}^{1}) = \frac{4A}{\pi\sqrt{\left(\frac{m^2\pi^2 Q}{\beta^2} - \mu n^2\right)^2 + n^2\nu^2}} \Bigg\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5c)$$

Dieser Wert ist ganz unabhängig von der Größe des Winkels, den die Membran ausfüllt. Statt der Entfernung ϱ oder x vom Scheitel kommt darin nur noch die Breite β der Membran an der betreffenden Stelle vor. Derselbe Ausdruck wird also auch noch gelten, wenn der Winkel gleich Null ist und die Membran zwischen zwei parallelen Linien wie eine Saite schwingt und dabei m schwingende Abteilungen bildet, die durch den Rändern parallele Knotenlinien getrennt sind.

Für eine Saite übrigens ergibt sich derselbe Ausdruck, wenn man von Anfang an in Gleichung (1) z nur als Funktion von y in einer Linie betrachtet und als unabhängig von x ansieht, als Grenzbedingung aber festhält, daß für $y = \pm\beta$ die Gleichung $z = 0$ stattfinde. Die Bewegung der Membran ist also dieselbe, als wenn sie aus einer Reihe nebeneinander liegender unverbundener Saiten bestände.

Der Wert von $\frac{1}{m} S_m$ in (5c) gibt uns die Amplitude der betreffenden Schwingungsform mit der Schwingungszahl $\frac{n}{2\pi}$ und mit m schwingenden Querabteilungen der Membran. Das Maximum von S_m wird eintreten, wo

$$m^2\pi^2 Q - \beta^2\mu n^2 = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Der Wert dieses Maximums selbst, den wir mit $\mathfrak{S}$ bezeichnen wollen, ist

$$\mathfrak{S} = \frac{4A}{\pi n\nu}.$$

---

[1]) [S_m bedeutet den Modul von s_m; vgl. engl. Übersetzung 2. Aufl., S. 410.]

Je kleiner der Reibungskoeffizient ν ist, desto größer wird dies Maximum an der betreffenden Stelle werden.

Wenn wir den Wert von β, welcher die Gleichung (6) erfüllt, mit b bezeichnen, so können wir Gleichung (5d) schreiben:

$$S_m = \frac{\mathfrak{S}}{\sqrt{1 + \frac{m^4 n^4 Q^2}{n^2 \nu^2}\left[\frac{1}{\beta^2} - \frac{1}{b^2}\right]^2}}.$$

Sobald ν unendlich klein ist, und in Gleichung (6) die Bedingung des Maximums nicht erfüllt ist, wird der Nenner dieses Ausdruckes unendlich groß, also S_m unendlich klein. Nur für diejenigen Werte von β, welche b so nahe kommen, daß $b - \beta$ von derselben Ordnung ist wie ν, behält $\frac{1}{m} S_m$, die Amplitude der Schwingungen, einen endlichen Wert. Unter diesen Umständen werden also alsdann von jedem einfachen Ton nur gewisse, in Richtung der x schmale Streifen der Membran in Schwingung gesetzt, von denen der erste eine, der zweite zwei, der dritte drei usw. schwingende Abteilungen hat, und in denen die Größe $\frac{\beta}{m}$, d. h. die Länge der schwingenden Abteilungen, überall denselben Wert hat.

Je größer der Reibungskoeffizient ν ist, desto mehr werden sich im allgemeinen die Schwingungen jedes Tones auf der Membran ausbreiten.

Die hier ausgeführte mathematische Analyse zeigt an, daß jeder zugeleitete Ton auch alle diejenigen Querfaserzüge der Membran erregen muß, auf denen er als Eigenton mit Bildung von Knotenpunkten erscheinen kann. Daraus würde folgen, daß, wenn die Membran des Labyrinths von durchaus gleichmäßiger Struktur wäre, wie die hier vorausgesetzte Membran, jede Erregung eines Querfaserbündels durch den betreffenden Grundton auch begleitet sein müßte von schwächeren Erregungen der ungeraden harmonischen Untertöne, deren Intensität allerdings mit den Faktoren $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{25}$, allgemein $\frac{1}{m^2}$ multipliziert sein würde. Diese Hypothese ist von Herrn Dr. Hugo Riemann in seiner „Musikalischen Logik" aufgestellt worden, doch ist davon im Ohr nichts zu bemerken. Ich glaube aber, daß man dies nicht notwendig als einen Einwand gegen die hier durchgeführte Theorie betrachten darf, da wahrscheinlich durch die Anhangsgebilde der Membrana basilaris die Bildung von Tönen mit Knotenlinien sehr erschwert ist.

Man kann die Lösung auch ohne Schwierigkeit ausdehnen auf den Fall, wo die Membran im Felde der ξ, v durch zwei Kreisbögen begrenzt ist, deren Mittelpunkt im Scheitel des Winkels ε liegt. Dem entsprechen dann in Wirklichkeit, also im Felde der x, y, zwei elliptische Begrenzungsbögen, die, wenn P verschwindet, zu geraden Linien werden. Man hat dem Wert von s_m in (4b) nur noch ein vollständiges Integral der Gleichung (3c) hinzuzufügen, welches durch Besselsche Funktionen mit zwei willkürlichen Konstanten darzustellen ist. Letztere sind so zu bestimmen, daß s_m an den gewählten Grenzkurven gleich Null wird. Wenn ν klein ist, hat diese Änderung der Grenzen keinen wesentlichen Einfluß auf die Bewegung der Membran, außer wenn dies Maximum der Schwingung in die Nähe der Grenze fällt.

Beilage XII.

Theorie der Kombinationstöne.

Zu Seite 262.

Es ist bekannt, daß das Prinzip von der ungestörten Superposition oszillierender Bewegungen im allgemeinen nur so lange gilt, als die Bewegungen klein sind, so klein, daß die Bewegungskräfte, welche durch die Verschiebungen der kleinsten Teile des schwingenden Mittels gegeneinander hervorgerufen werden, diesen Verschiebungen selbst merklich proportional sind. Es läßt sich nun zeigen, daß Kombinationstöne entstehen müssen, sobald die Schwingungen so groß werden, daß auch noch das Quadrat der Verschiebungen auf die Bewegungen Einfluß erhält. Es möge für jetzt genügen, als einfachstes Beispiel die Bewegung eines einzelnen Massenpunktes unter dem Einfluß eines Wellenzuges zu betrachten, um das Resultat zu entwickeln. Nach einer ganz ähnlichen Methode lassen sich auch die Bewegungen der Luft und anderer elastischer Medien behandeln. Ein Punkt von der Masse m soll in Richtung der x-Achse oszillieren können. Die Kraft, welche ihn in seine Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt, sei

$$k = ax + bx^2.$$

Es mögen auf ihn zwei Schallwellenzüge einwirken mit der Kraft $f \sin(pt)$ und $g \sin(pt + c)$, so ist seine Bewegungsgleichung

$$-m\frac{d^2x}{dt^2} = ax + bx^2 + f\sin(pt) + g\sin(qt + c).$$

Diese Gleichung kann man durch eine Reihe integrieren, indem man darin setzt:

$$x = \varepsilon x_1 + \varepsilon^2 x_2 + \varepsilon^3 x_3 + \text{usw.}$$
$$f = \varepsilon f_1$$
$$g = \varepsilon g_1$$

und die mit gleichen Potenzen von ε multiplizierten Glieder einzeln gleich Null setzt, also:

1. $$ax_1 + m\frac{d^2x_1}{dt^2} = -f_1\sin(pt) - g_1\sin(qt + c),$$

2. $$ax_2 + m\frac{d^2x_2}{dt^2} = -bx_1^2,$$

3. $$ax_3 + m\frac{d^2x_3}{dt^2} = -2bx_1x_2 \text{ usw.}$$

Aus der ersten Gleichung ergibt sich

$$x_1 = A\sin\left(t\sqrt{\frac{a}{m}} + b\right) + u\sin(pt) + v\sin(qt + c),$$

wobei

$$u = \frac{f_1}{mp^2 - a} \quad \text{und} \quad v = \frac{g_1}{mq^2 - a}.$$

Es ist dies das bekannte Resultat für unendlich kleine Schwingungen, wonach der mitschwingende Körper nur seinen eigenen Ton $\sqrt{\frac{a}{m}}$ und die ihm mitgeteilten

p und q angibt. Da der Eigenton hierbei schnell verschwindet, können wir $A = 0$ setzen. Dann gibt die Gleichung (2):

$$x_2 = -\frac{b}{2a}(u^2+v^2) - \frac{u^2}{2(4mp^2-a)}\cos(2pt) - \frac{u^2}{2(4mq^2-a)}\cos 2(qt+c)$$
$$+\frac{uv}{m(p-q)^2-a}\cos[(p-q)t-c] - \frac{uv}{m(p+q)^2-a}\cos[(p+q)t+c].$$

Dieses zweite Glied der Reihe für x enthält, wie man sieht, außer einer Konstanten die Töne $2p$, $2q$, $(p-q)$ und $(p+q)$. Ist der Eigenton $\sqrt{\frac{a}{m}}$ des mitschwingenden Körpers tiefer als $(p+q)$, wie man es für das mit den Gehörknöchelchen verbundene Trommelfell des Ohres in den meisten Fällen wird voraussetzen dürfen, und sind die Intensitäten u und v nahe gleich, so wird von den einzelnen Gliedern von x_2 der Ton $(p-q)$ die größte Intensität haben; er entspricht dem bekannten tiefen Kombinationston. Der Ton $(p+q)$ wird viel schwächer sein, und die Töne $2p$ und $2q$ werden als schwache harmonische Obertöne der primären schwer zu hören sein.

Das dritte Glied der Reihe x_3 enthält die Töne $3p$, $3q$, $2p+q$, $2p-q$, $p+2q$, $p-2q$, p und q. Von diesen ist $2p-q$ oder $2q-p$ ein Kombinationston zweiter Ordnung nach Hallstroems Bezeichnung. Ebenso gibt das vierte Glied x_4 Kombinationstöne dritter Ordnung usw.

Wenn wir nun annehmen, daß bei den Schwingungen des Paukenfells und seiner Annexa das Quadrat der Elongationen auf die Schwingungen Einfluß gewinnt, so geben die ausgeführten mechanischen Entwickelungen einen vollständigen Aufschluß über die Entstehung der Kombinationstöne. Namentlich erklärt die neue Theorie ebensogut das Entstehen der Töne $(p+q)$, wie der Töne $(p-q)$, und läßt einsehen, warum bei vermehrter Intensität u und v der primären Töne die der Kombinationstöne, welche proportional uv ist, in einem schnelleren Verhältnis steigt.

Aus der Voraussetzung über die Größe der wirkenden Kraft, welche wir oben gemacht haben.

$$k = ax + bx^2,$$

folgt, daß, bei einem Zeichenwechsel von x, k nicht bloß sein Zeichen, sondern auch seinen absoluten Wert ändert. Diese Annahme paßt also nur auf einen elastischen Körper, der sich gegen positive und negative Verschiebungen nicht symmetrisch verhält; nur bei einem solchen kann das Quadrat der Elongationen Einfluß auf die Bewegungen haben und die Kombinationstöne erster Ordnung hervorrufen. Unter den im Ohr des Menschen vorhandenen schwingenden Teilen ist nun besonders das Trommelfell durch seine Asymmetrie ausgezeichnet, indem es durch den Stiel des Hammers stark nach innen gezogen ist, und ich glaube deshalb die Vermutung aufstellen zu dürfen, daß namentlich diese eigentümliche Form des Trommelfells das Entstehen der Kombinationstöne bedinge.

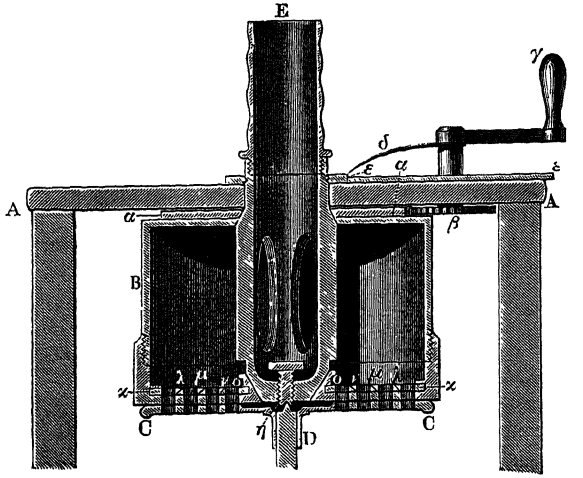
Beilage XIII.

Beschreibung des Mechanismus für die Öffnung einzelner Löcherreihen in der mehrstimmigen Sirene.

Zu Seite 269.

In Fig. 65 ist ein Querschnitt des oberen Kastens der Doppelsirene dargestellt, um dessen innere Konstruktion zu zeigen. *E* ist das Windrohr, welches sich in das Innere des Kastens hinein verlängert und fest eingefügt ist in den oberen Querbalken des Gestelles *AA*. Die in den Kasten *B* hineinragende Verlängerung des

Fig. 65.



Windrohres hat am oberen und unteren Ende kegelförmige Flächen, auf denen entsprechende Aushöhlungen im Boden und Deckel des Kastens gleiten, so daß letzterer sich frei um das Windrohr als Achse drehen kann. Bei α sieht man den Querschnitt des Zahnrades, welches am Boden des Kastens festsitzt. Bei β das Getriebe, welches mittels der Kurbel γ gedreht wird; δ ist der Zeiger, der nach der Teilung am Rande der Scheibe $\varepsilon\varepsilon$ hin gerichtet ist.

D ist das obere Ende von der Achse der beweglichen Scheiben, von denen man die obere, *CC*, hier sieht. Die Achse läuft auf feinen Spitzen in kegelförmigen Pfannen. Die obere Pfanne befindet sich im unteren Ende der Schraube η, welche durch einen von oben her eingeführten Schraubenzieher mehr oder weniger angezogen werden kann, so daß man den wünschenswerten Grad von Leichtigkeit und Sicherheit der Bewegung der Achse erreicht.

Im Inneren des Kastens sieht man die Querschnitte von vier durchlöcherten Ringen, $\varkappa\lambda$, $\lambda\mu$, $\mu\nu$ und νo, welche mit schräg geschnittenen Rändern dachziegelförmig übereinander greifen und sich so gegenseitig festhalten. Jeder dieser Ringe liegt unter einer der Löcherreihen des Deckels und enthält genau ebensoviel Löcher, wie die entsprechende Reihe des Deckels und der rotierenden Scheibe. Mittels der

Stiftchen *ii*, welche man in der S. 270 gegebenen Fig. 56 sieht, können die vier genannten Ringe etwas verschoben werden, so daß entweder die Löcher des Ringes mit den Löchern des Kastens zusammenfallen, die Luft freien Ausgang erhält und der entsprechende Ton zustande kommt, oder aber der Ring sich so stellt, daß die Zwischenräume seiner Löcher die Löcher des Deckels schließen; dann ist die entsprechende Löcherreihe gesperrt und ihr Ton bleibt natürlich aus.

Auf diese Weise kann man nacheinander oder nebeneinander die verschiedenen Töne einer solchen Sirene nach Belieben einzeln oder kombiniert angeben.

Beilage XIV.

Schwankung der Tonhöhe bei den Schwebungen einfacher Töne.

Zu Seite 274.

Es sei die Geschwindigkeit v eines unter dem Einfluß zweier Töne schwingenden Teilchens

$$v = A \sin(mt) + B \sin(nt + c),$$

worin m sehr wenig von n unterschieden sei und $A > B$. Wir können dann setzen:

$$nt + c = mt - [(m-n)t - c]$$
$$v = \{A + B\cos[(m-n)t - c]\} \sin(mt) - B \sin[(m-n)t - c] \cos(mt).$$

Setzen wir

$$A + B\cos[(m-n)t - c] = C\cos\varepsilon$$
$$B \sin[(m-n)t - c] = C \sin\varepsilon,$$

so ist

$$v = C \sin(mt - \varepsilon),$$

worin C und ε langsam sich ändernde Funktionen der Zeit t sind, wenn, wie vorausgesetzt ist, $m - n$ eine im Vergleich mit m kleine Größe ist.

Die Intensität C dieser Oszillation ist

$$C^2 = A^2 + 2AB\cos[(m-n)t - c] + B^2.$$

Sie wird ein Maximum

$$C^2 = (A+B)^2, \quad \text{wenn} \quad \cos[(m-n)t - c] = +1,$$

dagegen ein Minimum

$$C^2 = (A-B)^2, \quad \text{wenn} \quad \cos[(m-n)t - c] = -1.$$

Die veränderliche Phase ε der Bewegung wird gegeben durch folgende Gleichung:

$$\operatorname{tang}\varepsilon = \frac{B \sin[(m-n)t - c]}{A + B\cos[(m-n)t - c]}.$$

Wenn $A > B$, wird diese Tangente niemals unendlich groß, und ε bleibt deshalb jedenfalls zwischen den Grenzen $+\frac{\pi}{2}$ und $-\frac{\pi}{2}$ eingeschlossen, denen es sich abwechselnd nähert. Solange der Wert von ε steigt, wächst $mt - \varepsilon$ langsamer als mt, solange jener Wert fällt, wächst dieses schneller; dort wird also der Ton tiefer, hier höher werden müssen.

Die mit 2π multiplizierte Schwingungszahl des veränderlichen Tones ist unter diesen Umständen gleich

$$m - \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{m A^2 + (m+n) A B \cos[(m-n)t - c] + n B^2}{A^2 + 2 A B \cos[(m-n)t - c] + B^2}.$$

Die Grenzwerte hiervon treten ein, wo $\cos[(m-n)t - c]$ seine Grenzwerte, $+1$ und -1, erreicht, und also auch die Tonstärke ein Maximum oder Minimum ist.

1. Wenn die Tonstärke in Maximo, ist die Schwingungszahl

$$\frac{mA + nB}{A + B} = m - \frac{(m-n)B}{A+B} = n + \frac{(m-n)A}{A+B}.$$

2. Wenn die Tonstärke in Minimo, ist die Schwingungszahl

$$\frac{mA - nB}{A - B} = m + \frac{(m-n)B}{A-B} = n + \frac{(m-n)A}{A-B}.$$

Im ersteren Falle liegt also die Tonhöhe des veränderlichen Tones zwischen denen der beiden einzelnen Töne. Während des Minimums der Tonstärke dagegen ist sie höher als beide Einzeltöne, wenn der stärkere Ton gleichzeitig der höhere ist, dagegen tiefer als beide, wenn der stärkere Ton der tiefere ist.

Mit zwei gedackten Pfeifen hört man diese Unterschiede gut. Auch mit zwei Stimmgabeln, wenn man abwechselnd die höhere oder tiefere der Resonanzröhre näher bringt.

Beilage XV.

Berechnung der Intensität der Schwebungen verschiedener Intervalle.

Zu Seite 312 und 318.

Wir benutzen wieder die in der Beilage IX unter (4a), (4b), (5) und (5a) entwickelten Formeln für die Stärke des Mitschwingens. Es sei für den Ton stärkster Resonanz eines Cortischen Elementarorgans n die Anzahl der Schwingungen in 2π Sekunden, n_1 und n_2 seien die entsprechenden Schwingungszahlen für zwei gehörte Töne und $\mathfrak{B}_1$ sowie $\mathfrak{B}_2$ die Geschwindigkeitsmaxima der Schwingungen, welche sie in den gleichgestimmten Cortischen Organen hervorbringen, so sind die Geschwindigkeitsmaxima B_1 und B_2, welche beide in dem Gebilde von der Schwingungszahl n hervorbringen, nach Gleichung (5a), Beilage IX:

$$B_1 = \mathfrak{B}_1 \sin \varepsilon_1$$
$$B_2 = \mathfrak{B}_2 \sin \varepsilon_2,$$

worin

$$n \operatorname{tang} \varepsilon_1 = \frac{\beta}{\frac{n}{n_1} - \frac{n_1}{n}} \quad \text{und} \quad n \operatorname{tang} \varepsilon_2 = \frac{\beta}{\frac{n}{n_2} - \frac{n_2}{n}}.$$

Darin ist β eine Größe, welche wir als unabhängig von n betrachten können. Die Intensität der Schwingungen des Organs von der Schwingungszahl n schwankt demnach, wenn beide Töne n_1 und n_2 zusammenwirken, zwischen den Werten:

$$(B_1 + B_2)^2 \quad \text{und} \quad (B_1 - B_2)^2.$$

Der Unterschied beider Größen, welcher die Stärke der Schwebungen mißt, ist:

$$4 B_1 B_2 = 4 \mathfrak{B}_1 \mathfrak{B}_2 \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Bei gleichen Unterschieden in der Stimmung ist die Stärke der Schwebungen also unabhängig von dem Produkt $\mathfrak{B}_1 \mathfrak{B}_2$. Für den $m$ten Oberton eines Violinklanges können wir $\mathfrak{B}^2 = \frac{\mathfrak{A}^2}{m^4}$ setzen, nach Beilage VI, und wenn also der $m_1$te und $m_2$te Oberton zweier Violinklänge Schwebungen geben, setzen wir die Intensität ihrer Schwebungen bei gleichen Intervalldifferenzen gleich

$$\frac{\mathfrak{A}^2}{m_1 m_2}.$$

Dieser Ausdruck ist der Berechnung der letzten Spalte der Tabelle auf S. 312 zugrunde gelegt worden.

Für die auf S. 317 bis 319 besprochene Berechnung der Rauhigkeit verschiedener Intervalle führen wir noch folgende abkürzende Bezeichnungen ein:

$$\begin{aligned} n_1 + n_2 &= 2N, \\ n_1 &= N(1 + \delta), \\ n_2 &= N(1 - \delta), \\ n &= N(1 + \nu). \end{aligned}$$

Dann ist

$$\pi \, tang \, \varepsilon_1 = \frac{\beta}{\frac{1+\nu}{1+\delta} - \frac{1+\delta}{1+\nu}}, \quad \pi \, tang \, \varepsilon_2 = \frac{\beta}{\frac{1+\nu}{1-\delta} - \frac{1-\delta}{1+\nu}}.$$

Da kräftiges Mitschwingen nur stattfindet, wenn ν und δ sehr klein sind, so kann man annähernd setzen:

$$tang \, \varepsilon_1 = \frac{\beta}{2\pi(\nu - \delta)}, \quad tang \, \varepsilon_2 = \frac{\beta}{2\pi(\nu + \delta)}.$$

Diese Werte in Gleichung (7) eingesetzt ergeben:

$$4 B_1 B_2 = 4 \mathfrak{B}_1 \mathfrak{B}_2 \frac{\beta^2}{\sqrt{\beta^2 + 4\pi^2(\nu - \delta)^2}\sqrt{\beta^2 + 4\pi^2(\nu + \delta)^2}} \quad \cdots \quad (7a)$$

Wenn wir nun ν, d. h. die Tonhöhe des mitschwingenden Cortischen Organs, als veränderlich betrachten, erreicht der Wert von $4 B_1 B_2$ sein Maximum, wenn $\nu = 0$, also $n = N = \frac{1}{2}(n_1 + n_2)$; und der Wert dieses Maximum selbst, den wir mit s bezeichnen wollen, ist:

$$s = 4 \mathfrak{B}_1 \mathfrak{B}_2 \frac{\beta^2}{\beta^2 + 4\pi^2 \delta^2} \quad \cdots \quad (7b)$$

Ich habe mich bei Berechnung des Grades der Rauhigkeit, welche der Zusammenklang zweier Töne gibt, die um das Intervall 2δ voneinander entfernt sind, damit begnügt, den hier gefundenen Maximalwert der Schwebungen zu berücksichtigen, welcher in dem am günstigsten gelegenen Cortischen Organ stattfindet. Allerdings werden schwächere Schwebungen auch noch in den benachbarten Faserbögen erzeugt, aber in schnell abnehmender Intensität. Es könnte deshalb vielleicht als ein genaueres Verfahren erscheinen, wenn man den Wert von $4 B_1 B_2$ in Gleichung (7a) nach ν integrierte, um die Summe der Schwebungen in allen Cortischen Organen zu erhalten. Dann müßte man aber noch irgend eine wenigstens annähernde Kenntnis von der Dichtigkeit der Cortischen Organe für verschiedene Werte von ν, d. h. für verschiedene Teile der Skala haben, welche uns abgeht. In der Empfindung kommt

es jedenfalls mehr auf den stärksten Grad der Rauhigkeit an, als auf die Ausbreitung schwächerer Rauhigkeit über viele empfindende Organe. Ich habe deshalb vorgezogen, nur das in (7b) gegebene Maximum der Schwebungen zu berücksichtigen.

Schließlich muß noch beachtet werden, daß sehr langsame Schwebungen keine Rauhigkeit geben, daß diese bei gleicher Intensität der Schwebungen und steigender Zahl ein Maximum erreicht und dann wieder abnimmt. Um dies auszudrücken, muß der Wert von s noch mit einem Faktor multipliziert werden, welcher gleich Null wird, wenn die Zahl der Schwebungen sehr klein ist, welcher bei etwa 30 Schwebungen sein Maximum erreicht und dann wieder abnimmt, um für unendlich viel Schwebungen wieder gleich Null zu werden. Wir setzen also die Rauhigkeit r, welche vom $a$ten Oberton herrührt:

$$r_a = \frac{4\,\vartheta^2\,\delta^2\,a^2}{(\vartheta^2 + a^2\,\delta^2)^2}\,s_a.$$

Der Faktor von s_a erreicht den Maximalwert 1, wenn $a\,\delta = \vartheta$ wird, den Wert 0, wenn δ, welches den halben Abstand der beiden Töne in der Skala bezeichnet, gleich 0 oder gleich ∞ wird. Da es gleichgültig ist, ob δ positiv oder negativ ist, mußte der Ausdruck zu einer geraden Funktion von δ gemacht werden. Es ist der einfachste Ausdruck, der den gegebenen Bedingungen genügt, er ist aber natürlich bis zu einem gewissen Grade willkürlich.

Für ϑ ist die halbe Breite desjenigen Intervalles zu setzen, welches in der Höhe des tieferen Grundtones 30 Schwebungen in der Sekunde gibt.

Da wir c' mit 264 Schwingungen als Grundton genommen haben, ist gesetzt worden $\vartheta = \frac{15}{264}$. Es wird also schließlich:

$$r_a = 16\,\mathfrak{B}_1\,\mathfrak{B}_2\,\frac{\beta^2\,\vartheta^2\,\delta^2\,a^2}{(\beta^2 + 4\,\pi^2\,\delta^2)\,(\vartheta^2 + a^2\,\delta^2)}.$$

Nach dieser Formel sind nun für die Diagramme, Fig. 60 a und b, S. 318, die Rauhigkeiten der Intervalle berechnet worden, welche von den einzelnen Obertönen herrühren, und einzeln übereinander in die Zeichnung eingetragen.

Wenn auch die Genauigkeit der Theorie noch manches zu wünschen übrig läßt, so leistet dieselbe doch soviel, zu zeigen, daß die von uns aufgestellte theoretische Ansicht eine solche Verteilung der Dissonanzen und Konsonanzen, wie sie in der Natur vorkommt, wirklich erklären kann.

Herr Alfred M. Mayer [Professor in Hoboken, New Jersey [1])] hat Versuche über die Nachdauer der Gehörempfindung und die Anzahl der hörbaren Schwebungen angestellt, indem er zwischen einer schwingenden Stimmgabel und ihrem Resonator eine Scheibe mit Öffnungen, die der des Resonators gleich gestaltet waren, umlaufen ließ, so daß der Ton stark gehört wurde, wenn eine Öffnung der Scheibe vor der des Resonators stand, schwach, wenn die letztere gedeckt war. Seine Resultate stimmen im wesentlichen mit den von mir auf S. 233 bis 238 und 306 bis 309 gemachten Annahmen, sind aber vollständiger durch die ganze Skala verfolgt. Seine Angaben sind folgende:

[1]) Sillimans Journ., Ser. III, Vol. VIII, Oktober 1874. Philosophical Magazine. Mai 1875. Vol. 2.

Ton	Schwingungszahl	Anzahl der Schwebungen	
		bei der die Unterbrechungen verschwinden	für die stärkste Dissonanz
C	64	16	6,4
c	128	26	10,4
c'	256	47	18,8
g'	384	60	24,0
c''	512	78	31,2
e''	640	90	36,0
g''	768	109	43,6
c'''	1024	135	54,0

Beilage XVI.

Schwebungen der Kombinationstöne.

Zu Seite 308 und 327.

Es seien a, b, c, d, e, f, g, h ganze Zahlen. Die Schwingungszahlen zweier zugleich angegebener Klänge seien an und $bn + \delta$, wo δ als sehr klein gegen n vorausgesetzt wird, und a und b die kleinsten ganzen Zahlen sind, in denen das Verhältnis $a : b$ ausgedrückt werden kann. Die Schwingungszahlen je zweier Obertöne dieser Klänge werden sein:

$$acn \quad \text{und} \quad bdn + d\delta.$$

Diese werden miteinander Schwebungen geben, deren Anzahl $d\delta$ ist, wenn

$$ac = bd$$

oder

$$\frac{a}{b} = \frac{d}{c}.$$

Da das Verhältnis $\frac{a}{b}$ in kleinsten Zahlen ausgedrückt sein soll, werden d und c keine kleineren Werte haben können, als:

$$d = a \qquad c = b,$$

die übrigen Werte sind:

$$d = ha \qquad c = hb.$$

Nun bedeuten c und d die Ordnungszahlen der Teiltöne, welche Schwebungen miteinander geben; die niedrigsten Teiltöne dieser Art werden also sein der $b$te Ton des Klanges an und der $a$te Ton des Klanges $(bn + \delta)$. Die Zahl der Schwebungen, welche diese beiden geben, ist $a\delta$.

Ebenso geben der $2b$te Teilton des ersten und der $2a$te des zweiten Klanges $2a\delta$ Schwebungen usw.

Die beiden Obertöne

$$acn \quad \text{und} \quad bdn + d\delta$$

geben den Kombinationston (ersten Differenzton)

$$\pm [(bd - ac)n + d\delta],$$

wobei das Vorzeichen so zu wählen ist, daß der Wert des ganzen Ausdruckes positiv wird.

Zwei andere Obertöne $(f a n)$ und $(g b n + g \delta)$ geben den Kombinationston

$$\pm [(g b - a f) n + g \delta].$$

Beide zusammenklingend werden $(g \mp d)\ \delta$ Schwebungen geben, wenn

$$b d - a c = \pm [g b - a f]$$

oder

$$\frac{a}{b} = \frac{g \mp d}{f \mp c}.$$

Wie vorher folgt, daß der kleinste Wert von $g \mp d = a$ ist, die übrigen größeren $= h a$, also die kleinste Anzahl der Schwebungen $a \delta$.

Um die niedrigsten Werte der Obertöne zu finden, welche vorhanden sein müssen, um mit Hilfe der ersten Differenztöne Schwebungen zu geben, wählen wir für c und d das untere Zeichen, wir erhalten dann:

$$g = d = \frac{a}{2} \text{ oder } g = \frac{a+1}{2} \text{ und } d = \frac{a-1}{2}$$

$$f = c = \frac{b}{2} \text{ oder } f = \frac{b+1}{2} \text{ und } c = \frac{b-1}{2},$$

je nachdem a und b gerade oder ungerade Zahlen sind. Ist b die größere Zahl, so ist $\frac{b}{2}$ oder $\frac{b+1}{2}$ die Anzahl von Teiltönen, welche jeder Klang haben muß, um die Schwebungen des Intervalles zu geben, während ohne Berücksichtigung der Kombinationstöne etwa die doppelte Anzahl, nämlich b, nötig ist.

Wenn einfache Töne zusammenkommen, rühren die Schwebungen von den Kombinationstönen höherer Ordnung her. Der allgemeine Ausdruck für einen Differenzton höherer Ordnung zweier Töne von den Schwingungszahlen n und m ist $\pm [a n - b m]$, und zwar ist dieser Ton dann von der $(a + b - 1)$ten Ordnung. Die Schwingungszahl eines Kombinationstones $(c + d - 1)$ter Ordnung der Töne $a n$ und $[b n + \delta]$ sei:

$$\pm [(b d - c a) \,.\, n + d \delta]$$

und eines anderen von $(f + g - 1)$ter Ordnung:

$$\pm [(g b - f a) \,.\, n + g \delta],$$

beide geben $(g \mp d)\ \delta$ Schwebungen, wenn

$$b d - a c = \pm [b g - a f]$$

oder

$$\frac{a}{b} = \frac{g \mp d}{f \mp c}.$$

Die niedrigste Anzahl der Schwebungen ist also wieder $a \delta$, die niedrigsten Werte von c, d, f, g finden sich im vorigen Falle, so daß die Ordnungszahlen der Kombinationstöne nicht größer zu werden brauchen als $\frac{a+b-2}{2}$, wenn a und b ungerade sind, oder $\frac{a+b-1}{2}$, wenn eines von ihnen gerade ist.

Über die Entstehungsweise der Kombinationstöne will ich hier zu dem im siebenten Abschnitt Bemerkten noch folgendes hinzufügen:

Kombinationstöne müssen erstens überall entstehen, wo die Entfernung der schwingenden Teile aus ihrer Gleichgewichtslage so groß wird, daß die Kraft, welche sie zurückzuführen strebt, nicht mehr einfach jener Entfernung proportional ist. Die mathematische Theorie dieses Falles für einen schwingenden Massenpunkt ist oben in Beilage XII gegeben. Dasselbe ist der Fall für Luftschwingungen von endlicher

Größe; die Grundzüge der Theorie sind angegeben in meinem Aufsatz über Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden, Crelles Journ. f. Mathematik 57, 14. (Wiss. Abh. 1, 303.) Ich will hier aber noch auf einen dritten Fall aufmerksam machen, wo Kombinationstöne auch bei unendlich kleinen Schwingungen entstehen können, was oben (S. 259 bis 261) schon erwähnt ist. Es ist das der Fall der Sirenen und des Harmoniums. Wir haben hier Öffnungen, deren Weite periodisch wechselt, und haben auf der einen Seite Luft unter größerem Druck als auf der anderen. Da es sich hier immer nur um sehr kleine Druckunterschiede handelt, werden wir annehmen dürfen, daß die Masse q der entweichenden Luft proportional sei der Größe der Öffnung ω und dem Druckunterschied p, also

$$q = c\,\omega\,p,$$

wo c eine Konstante. Setzen wir nun für ω die einfachste periodische Funktion, welche einen wechselnden Schluß und Öffnung ausdrückt, nämlich:

$$\omega = A\,[1 - \sin 2\pi n t],$$

und setzen p als konstant, indem wir annehmen, daß ω so klein und der Luftzufluß so reichlich ist, daß der periodische Verlust durch die Öffnung den Druck nicht wesentlich ändert, so wird q von der Form

$$q = B\,[1 - \sin 2\pi n t]$$
$$B = cAp.$$

Dann wird auch die Geschwindigkeit der Schallbewegung an einer beliebigen Stelle des Luftraumes von ähnlicher Form sein müssen, so daß nur ein Ton von der Schwingungszahl n entsteht. Wenn nun aber eine zweite größere Öffnung von wechselnder Weite vorhanden ist, durch welche ein hinreichender Verlust an Luft stattfindet, daß der Druck p selbst nicht mehr konstant ist, sondern periodisch wechselt, in dem Maße, als durch die andere Öffnung Luft ausfließt, wenn also der Druck von der Form ist:

$$p = P\,[1 - \sin 2\pi m t],$$

so wird q werden:

$$\begin{aligned} q &= cAP\,[1 - \sin 2\pi n t]\,[1 - \sin 2\pi m t] \\ &= cAP\,[1 - \sin 2\pi n t - \sin 2\pi m t - \tfrac{1}{2}\cos 2\pi (m+n) t \\ &\qquad + \tfrac{1}{2}\cos 2\pi (m-n) t]; \end{aligned}$$

es werden also außer den primären Tönen n und m auch noch die Töne $m+n$ und $m-n$, d. h. die beiden Kombinationstöne erster Ordnung existieren.

In Wirklichkeit werden nun die Gleichungen immer viel komplizierter werden, als ich sie hier hingestellt habe, um den Vorgang in seiner einfachsten Gestalt darzustellen. Es wird der Ton n ebensogut Einfluß auf den Druck p haben wie m, ja sogar die Kombinationstöne werden p verändern, endlich wird meistens die Größe der Öffnung nicht durch eine so einfache periodische Funktion, wie wir für ω angenommen haben, ausgedrückt werden können. Dadurch muß denn bewirkt werden, daß außer den Tönen m, n, $m+n$, $m-n$ auch ihre Obertöne und die Kombinationstöne ihrer Obertöne zum Vorschein kommen, wie es bei den Versuchen auch beobachtet werden kann. Die vollständige Theorie eines solchen Falles wird außerordentlich kompliziert, es möge daher die des genannten einfachen Falles genügen, an dem das Wesen des Vorganges wenigstens klar wird.

Einen anderen Versuch, dessen Erklärung ähnlich ist, will ich hier noch erwähnen. Der untere Kasten meiner Doppelsirene klingt stark mit, wenn die Gabel

a' vor seine untere Öffnung gehalten wird, und die Löcher alle gedeckt sind, nicht aber, wenn die Löcher einer Reihe offen sind. Läßt man nun die Sirenenscheibe rotieren, so daß die Löcher abwechselnd offen und gedeckt sind, so erhält man eine Resonanz der Stimmgabel von periodisch wechselnder Stärke. Ist n die Schwingungszahl der Gabel, m die Zahl, welche angibt, wie oft ein einzelnes Loch des Kastens geöffnet wird, so ist die Stärke der Resonanz eine periodische Funktion der Zeit, also im einfachsten Falle zu setzen gleich

$$1 - \sin 2\pi m t.$$

Die Schwingungsbewegung der Luft erhält also dann die Form

$$(1 - \sin 2\pi m t) \sin 2\pi n t = \sin 2\pi n t + \tfrac{1}{2}\cos 2\pi (m+n) t - \tfrac{1}{2}\cos 2\pi (m+n) t$$

und man hört deshalb außer dem Ton n auch noch die Töne $m+n$ und $n-m$. Dreht sich die Sirenenscheibe langsam, so ist m sehr klein und die genannten Töne sind einander sehr nahe, so daß sie Schwebungen geben. Bei rascher Drehung dagegen trennt sie das Ohr.

Beilage XVII.

Plan für rein gestimmte Instrumente mit einem Manual.

Zu Seite 515.

Wenn man eine Orgel oder ein Harmonium mit 24 Tönen in der Oktave so anordnen will, daß man mit einem Manual in allen Tonarten rein spielen kann, muß man die Töne des Instrumentes in vier Paare von Gruppen sondern, etwa in folgender Weise.

1a)	*f*	*a*	*cis*	1b)	*f*	*a*	*cis*
2a)	*c*	*e*	*as*	2b)	*c*	*e*	*as*
3a)	*g*	*h*	*es*	3b)	*g*	*h*	*es*
4a)	*d*	*fis*	*b*	4b)	*d*	*fis*	*b*

Jede dieser Gruppen muß einen abgesonderten Windkanal vom Blasbalg aus erhalten, und es müssen Ventile angebracht werden in der Weise, daß je nach ihrer Stellung der Wind entweder der rechten oder der linken Gruppe der einzelnen Horizontalreihen zugeleitet wird. An den Orgeln ist dies ohne Schwierigkeit auszuführen; am Harmonium würden aber allerdings die Tasten in einer anderen Reihe stehen müssen als die Zungen, und es würde, wie an der Orgel, eine kompliziertere Übertragung der Bewegung von der Taste auf die Ventile nötig werden.

Es sind also vier Ventile durch Registerzüge oder Pedale zu stellen, für jede Tonart anders. Die Übersicht der Stellungen für die vier Horizontalreihen der oben angegebenen Töne ist in der ersten Tabelle auf S. 657 gegeben.

Die eingeklammerten Molltonarten haben eine richtige kleine Septime, aber einen zu hohen Leitton; für die sechs mit einem Sternchen versehenen Tonarten bleibt die Stellung der Registerzüge in Dur und Moll dieselbe.

Wird ein voller Umlauf von Toniken verlangt, die ganz reine Dur- und Molltonarten gleichzeitig haben, so müssen noch die Töne *as*, *es*, *b*, *f*, *c* und *g* von den

Durtonarten	Reihe				Molltonarten
	1	2	3	4	
*Ces**	*b*	*a*	*a*	*a*	*(Es)*
*Ges**	*b*	*b*	*a*	*a*	*(B)*
*Des**	*b*	*b*	*b*	*a*	*(F)*
*As**	*b*	*b*	*b*	*b*	*(C)*
*Es**	*a*	*b*	*b*	*b*	*(G)*
*B**	*a*	*a*	*b*	*b*	*(D)*
F	*a*	*a*	*a*	*b*	*A*
C	*a*	*a*	*a*	*a*	*E*
G	*b*	*a*	*a*	*a*	*H** oder *Ces*
D	*b*	*b*	*a*	*a*	*Fis** „ *Ges*
A	*b*	*b*	*b*	*a*	*Cis** „ *Des*
E	*b*	*b*	*b*	*b*	*Gis** „ *As*
H	*a*	*b*	*b*	*b*	*Dis** „ *Es*
	a	*a*	*b*	*b*	*Ais** „ *B*

übrigen abgesondert werden, so daß durch Ziehung eines fünften besonderen Registerzuges diese vertauscht werden mit den Tönen *gis*, *dis*, *ais*, *eis*, *his* und *fisis*, wobei also 30 Töne auf die Oktaven kommen würden. Durch Ziehung dieses einen Zuges erhielten wir dann folgendes System von Tonarten:

Durtonarten	Reihe				Molltonarten
	1	2	3	4	
F	*a*	*a*	*a*	*b*	*F*
C	*a*	*a*	*a*	*a*	*C*
G	*b*	*a*	*a*	*a*	*G*
D	*b*	*b*	*a*	*a*	*D*
A	*b*	*b*	*b*	*a*	*A*
E	*b*	*b*	*b*	*b*	*E*
H	*a*	*b*	*b*	*b*	*Dis*
Fis	*a*	*a*	*b*	*b*	*Ais*
Cis	*a*	*a*	*a*	*b*	*Eis*
Gis	*a*	*a*	*a*	*a*	*His*
Dis	*b*	*a*	*a*	*a*	*Fisis*
Ais	*b*	*b*	*a*	*a*	*Cisis*
Eis	*b*	*b*	*b*	*a*	*Gisis*

Wollte man verlangen, daß nur ein vollständiger Umlauf von Molltonarten da sei, so würden nicht 30, sondern nur 28 Töne für die Oktave nötig sein, welche für die 12 Molltonarten von *A*, *E*, *H*, *Fis* oder *Ges*, *Cis* oder *Des*, *Gis* oder *As*, *Dis* oder *Es*, *B*, *F*, *C*, *G* und *D* und für 17 Durtonarten von *Ces*-Dur bis *Gis*-Dur genügen würden.

Über ein von Herrn Bosanquet ausgeführtes vollständiges Instrument zu gleichem Zweck siehe Beilage XIX.

Beilage XVIII.

Anwendung der reinen Intervalle beim Gesang.

Zu Seite 523.

Seit der ersten Veröffentlichung dieses Buches habe ich auch Gelegenheit gehabt, die vom General Perronet Thompson[1]) konstruierte enharmonische Orgel zu sehen, welche sich durch die Dur- und Molltonarten von 21 verschiedenen, harmonisch verbundenen Toniken in natürlicher Stimmung zu spielen erlaubt. Dieses Instrument ist viel komplizierter als mein Harmonium; es enthält 40 verschiedene Pfeifen für die Oktave und drei verschiedene Manuale mit zusammen 65 Tasten für die Oktave, wobei dieselben Noten zum Teil in zwei oder auch in allen drei Manualen vorkommen. Das Instrument erlaubt viel ausgedehntere Modulationen auszuführen, als das von mir beschriebene Harmonium, ohne daß enharmonische Verwechselungen nötig werden. Auch kann man ziemlich schnelle Passagen und Verzierungen darauf ausführen, trotz seiner anscheinend sehr verwickelten Tastatur. Die Orgel ist gebaut durch Messrs. Robson, London. Sie enthält nur ein Register gewöhnlicher Prinzipalpfeifen, ist mit Jalousieschwellern und mit einem eigentümlichen Mechanismus versehen, um den Einfluß der Temperatur auf die Stimmung zu beseitigen.

Herr H. W. Poole[2]) hat neuerdings seine auf S. 523 (Anmerkung) erwähnte Orgel so umgeformt, daß die Stimmung durch Registerzüge beseitigt ist, und hat eine besondere Tastatur konstruiert, welche erlaubt, in allen Tonarten mit demselben Fingersatz zu spielen. Seine Skala enthält nicht nur die reinen Quinten und Terzen aus der Reihe der Durakkorde, sondern auch die natürlichen Septimen für die Töne beider Reihen. Die Zahl der Pfeifen ist 78 für die Oktave, wobei die Vertauschung von *Fes* mit *E*, wie bei meinem Harmonium, angewendet ist.

Die Akkordfolgen der Orgel von P. Thompson sind außerordentlich wohlklingend, wegen der milderen Klangfarbe vielleicht von noch auffallenderem Wohlklang, als die meines Harmoniums. Aus demselben Grunde ist aber auch der Unterschied zwischen falschen und richtig gegriffenen Akkorden auf dieser Orgel nicht so einschneidend, wie auf dem Harmonium. Ich hatte Gelegenheit, eine Sängerin, die oft mit Begleitung der enharmonischen Orgel gesungen hatte, zu dem Instrument zu hören, und kann versichern, daß dieser Gesang ein eigentümlich befriedigendes Gefühl vollkommener Sicherheit der Intonation gewährte, was bei der Begleitung mit dem Klavier zu fehlen pflegt. Auch ein Violinist war da, der noch nicht oft

[1]) *Principles and Practice of Just Intonation, illustrated on the Enharmonic Organ. 7th Edition. London 1863.*

[2]) American Journal of Science and Arts, Vol. XLIV, July 1867.

mit der Orgel zugleich gespielt hatte, und nach dem Gehör bekannte Arien begleitete. Er schmiegte sich der Intonation der Orgel vollkommen an, solange die Tonart unverändert blieb, und nur in einzelnen schnellen Modulationen wußte er noch nicht ganz genau zu folgen.

In London ist auch Gelegenheit gegeben, die Intonation dieses Instrumentes mit der natürlichen Intonation solcher Sänger zu vergleichen, die ganz ohne alle Instrumentalbegleitung singen gelernt haben und nur ihrem Gehör zu folgen gewöhnt sind. Es ist dies die Gesellschaft der Solfeggisten (*Tonic-Solfa-Association*), welche sehr zahlreich (1862 schon 150000) über die größeren Städte Englands ausgebreitet, und deren große Fortschritte für die Theorie der Musik sehr beachtenswert sind. Diese Gesellschaften brauchen zur Bezeichnung der Noten der Durskala die Silben *Do*, *Re*, *Mi*, *Fa*, *So*, *La*, *Ti*, *Do*, so daß *Do* immer die Tonika bezeichnet. Ihre Gesänge sind nicht in gewöhnlicher Notenschrift aufgeschrieben, sondern mit gewöhnlicher Druckschrift, wobei die Anfangsbuchstaben der genannten Silben die Tonhöhe bezeichnen.

Wenn durch Modulation die Tonika gewechselt wird, so wird die Bezeichnung ebenfalls so geändert, daß die neue Tonika wieder *Do* heißt, welcher Wechsel in der Notenschrift dadurch angekündigt wird, daß die Note, auf welcher der Wechsel stattfindet, zwei Bezeichnungen erhält, eine für die frühere, die zweite für die neue Tonika. Durch diese Bezeichnungsweise wird also vor allen anderen Dingen die Beziehung jeder Note zur Tonika hervorgehoben, während die absolute Tonhöhe, in der das Stück auszuführen ist, nur im Anfang angegeben wird. Da die Intervalle der natürlichen Durskala auf jede neue Tonart übertragen werden, welche durch Modulation eintritt, so werden alle Tonarten ohne Temperierung der Intervalle ausgeführt. Daß bei einer Modulation von *C*-Dur nach *G*-Dur das *Mi* (oder $\underline{h}$) der letzteren Skala genau dem *Ti* der ersteren, und das *Re* (oder *a*) der zweiten nahehin dem *La* (oder $\underline{a}$) der ersteren entspricht, ist in der Bezeichnungsweise gar nicht angedeutet, und wird erst bei weiterem Fortschritt des Unterrichtes gelernt. Es ist also auch gar keine Veranlassung für den Schüler gegeben, das *a* mit $\underline{a}$ zu verwechseln [1]).

Es läßt sich nun nicht verkennen, daß diese Bezeichnungsweise für den Gesangsunterricht den großen Vorteil hat, das herauszuheben, was bei der Bestimmung des Tones für den Sänger am wichtigsten ist, nämlich das Verhältnis zur Tonika. Es sind nur einzelne außerordentliche Talente imstande, absolute Tonhöhen festzuhalten und wiederzufinden, namentlich wenn noch andere Töne daneben angegeben werden. Die gewöhnliche Notenschrift gibt aber direkt nur die absoluten Tonhöhen an, und

[1]) Auskunft über die Prinzipien gibt *A Grammar of Vocal Music founded on the Tonic Solfa Method by* J. Curwen. *19th Edition. London, Ward and Co.* — Das Unterrichtsbuch für Schüler heißt: *The standard Course of lessons on the Tonic Solfa Method by* J. Curwen. *London, Tonic Solfa Agency. 43 Paternoster Row.* — Das Journal des Vereins ist *The Tonic Sol-Fa Reporter and Magazine of Vocal Music. London, Ward and Co.* — Eine Menge Musikalien in der eigentümlichen Notenschrift der Solfeggisten, unter anderen Mendelssohns Paulus, Händels Messias, Israel in Ägypten, Judas Maccabäus, das Dettinger Te Deum, Haydns Schöpfung, Frühling aus den Jahreszeiten usw. sind ebenfalls veröffentlicht. — In Frankreich wird der Gesang in der Schule *Galin-Paris-Chevé* nach ähnlichen Grundsätzen und mit Hilfe einer ähnlichen Notation gelehrt. (Vgl. hierzu die Ausführungen S. 422 ff. von Ellis.)

diese auch nur für die temperierte Stimmung. Jeder, der öfter vom Blatt gesungen hat, wird wissen, wieviel leichter dies nach einem Klavierauszug zu tun ist, in welchem man die Harmonie übersieht, als nach einer einzelnen Stimme. Im ersteren Falle kann man leicht erkennen, ob die zu singende Note Grundton, Terz, Quinte oder Dissonanz des jedesmaligen Akkordes ist, wonach man sich leicht orientiert; im zweiten Falle bleibt nichts übrig, als nach den vorgeschriebenen Intervallen auf und ab zu schreiten, so gut es geht, und sich darauf zu verlassen, daß die begleitenden Instrumente und anderen Stimmen die eigene Stimme in die richtige Tonhöhe hineindrängen werden.

Was nun einen mit der musikalischen Theorie vertrauten Sänger der Klavierauszug erkennen läßt, das zeigt die Bezeichnungsweise der Solfeggisten unmittelbar auch dem Ununterrichteten. Ich habe mich selbst überzeugt, daß man bei Benutzung dieser Bezeichnung auch nach einer einzelnen Stimme viel leichter richtig singt, als nach einer solchen in gewöhnlicher Notenschrift, und ich habe Gelegenheit gehabt, mehr als 40 Kinder zwischen 8 und 12 Jahren in einer der Volksschulen Londons Singübungen ausführen zu hören, welche durch die Sicherheit, mit der sie Noten lasen, und durch die Reinheit ihrer Intonation mich in Erstaunen setzten. Alljährlich pflegen die Londoner Schulen der Solfeggisten ein Konzert von 2000 bis 3000 Kinderstimmen im Kristallpalast zu Sydenham zu geben, welches, wie mir von Musikverständigen versichert wurde, durch den Wohlklang und die Genauigkeit der Ausführung den besten Eindruck auf die Hörer macht.

Die Solfeggisten nun singen nach natürlichen, nicht nach temperierten Intervallen. Wenn ihre Chöre von einer temperierten Orgel begleitet werden, so entstehen sehr merkliche Differenzen und Störungen, während sie sich in vollkommenem Einklang mit General P. Thompsons enharmonischer Orgel finden. Manche Äußerungen sind sehr charakteristisch. Ein junges Mädchen sollte ein Solostück aus *F*-Moll singen und nahm die Noten mit nach Haus, um am Klavier zu üben. Sie kam wieder mit der Erklärung, daß auf ihrem Klavier das *As* und *Des* nicht richtig wären, die Terz und Sexte der Tonart, bei denen die Abweichung in der temperierten Stimmung in der Tat am bedeutendsten ist. Eine andere ähnliche Schülerin war so befriedigt durch die enharmonische Orgel, daß sie drei Stunden hintereinander darauf übte, und erklärte, es sei so sehr angenehm, einmal wirkliche Noten zu spielen. Überhaupt stellte sich in einer großen Anzahl von Fällen heraus, daß junge Leute, die nach der Solfamethode singen gelernt hatten, sich durch Probieren auf der verwickelten Tastatur der enharmonischen Orgel von selbst und ohne Anweisung zurecht fanden und stets die theoretisch richtigen Intervalle wählten.

Sänger finden, daß es leichter ist, nach der Begleitung der genannten Orgel zu singen, und auch wohl, daß sie das Instrument während des Singens nicht hören, weil es nämlich in vollkommener Harmonie mit ihrer Stimme ist und keine Schwebungen macht.

Ich selbst habe übrigens beobachtet, daß auch Sänger, welche an Klavierbegleitung gewöhnt sind, wenn man sie eine einfache Melodie an dem natürlich gestimmten Harmonium singen läßt, natürliche Terzen und Sexten singen, nicht temperierte oder pythagoreische. Ich begleitete den Anfang einer Melodie und pausierte, wenn der Sänger die Terz oder Sexte der Tonart einsetzen sollte. Nachdem er eingesetzt hatte, gab ich auf dem Instrument entweder das natürliche oder das pythagoreische oder das temperierte Intervall an. Das erste war stets im Einklang mit der Singstimme, die beiden anderen gaben scharfe Schwebungen.

Nach diesen Erfahrungen, glaube ich, kann kein Zweifel darüber bleiben, wenn noch einer da war, daß die theoretisch bestimmten Intervalle, welche ich in dem vorliegenden Buche die natürlichen genannt habe, wirklich die natürlichen für das unverdorbene Ohr sind; daß ferner die Abweichungen der temperierten Stimmung dem unverdorbenen Ohr in der Tat merklich und unangenehm sind; daß drittens trotz der feinen Unterschiede in einzelnen Intervallen das richtige Singen nach der natürlichen Skala viel leichter ist, als nach der temperierten Skala. Die komplizierte Intervallenberechnung, welche die natürliche Skala nötig macht, und durch welche die Handhabung der Instrumente mit festen Tönen allerdings erschwert wird, existiert für den Sänger und auch für den Violinisten nicht, wenn letzterer sich nur von seinem Ohr leiten läßt. Denn im natürlichen Fortschritt einer richtig modulierten Musik haben sie immer nur nach Intervallen der natürlichen diatonischen Skala fortzuschreiten. Nur für den Theoretiker gibt es eine komplizierte Rechnung, wenn er schließlich das Resultat einer großen Menge solcher Fortschreitungen mit dem Ausgangspunkt vergleichen will.

Daß das natürliche System für Sänger durchführbar ist, zeigen die englischen Solfeggisten; daß es auf den Streichinstrumenten durchgeführt werden kann, und von ausgezeichneten Spielern in der Tat durchgeführt wird, bezweifle ich nicht mehr nach den oben erwähnten Untersuchungen von Delezenne und nach dem, was ich selbst von dem Violinspieler, der mit der enharmonischen Orgel spielte, gehört habe. Von den übrigen Orchesterinstrumenten haben die Blechinstrumente schon von selbst natürliche Stimmung und können sich nur mit Zwang dem temperierten System anschließen. Die Holzblasinstrumente würden ihre Töne etwas verändern können, um sich der Stimmung der übrigen anzuschließen. Ich glaube also nicht, daß man die Schwierigkeiten des natürlichen Systemes für unüberwindlich erklären könne; ja ich glaube, daß manche von unseren besten Musikaufführungen ihre Schönheit dem unbewußten Einführen des natürlichen Systemes verdanken, daß wir aber solchen Genuß öfter haben könnten, wenn dasselbe schulmäßig gelehrt und allem Musikunterricht zugrunde gelegt würde, statt des temperierten Systemes, welches die menschliche Stimme und die Streichinstrumente verhindern will, ihren vollen Wohlklang zu entfalten, um nicht der Bequemlichkeit des Klaviers und der Orgel zu nahe zu treten.

Gegen die hier aufgestellten Sätze ist von Musikern zum Teil in sehr absprechender Weise polemisiert worden. Ich zweifle keinen Augenblick, daß viele dieser meiner Gegner in der Tat sehr gute Musik machen, weil ihr Ohr sie zwingt, besser zu spielen, als es ihre bewußte Absicht ist, und als es ausfallen würde, wenn sie die Vorschriften der Schule wirklich ausführten und genau in pythagoreischer oder temperierter Stimmung spielten. Andererseits kann man sich meist aus diesen Schriften selbst davon überzeugen, daß die Schreibenden sich nie die Mühe genommen haben, die reine und temperierte Stimmung methodisch zu vergleichen. Ich kann nur immer wieder auffordern, erst zu hören, ehe man, auf eine unvollkommene Schultheorie gestützt, Urteile in die Welt sendet über Dinge, die man nicht aus eigener Erfahrung kennt. Und wer zu solchen Beobachtungen keine Gelegenheit hat, sehe doch nur die Literatur aus der Zeit an, als die gleichschwebende Temperatur eingeführt wurde. Zu der Zeit, wo die Orgel eine leitende Rolle unter den musikalischen Instrumenten hatte, war sie noch nicht temperiert gestimmt. Und das Klavier ist allerdings ein äußerst nützliches Instrument, um musikalische Literatur

kennen zu lernen, sowie für die häusliche Unterhaltung oder zur Begleitung anderer Stimmen, aber für höhere künstlerische Zwecke hat es doch keine solche Wichtigkeit, daß man seinen Mechanismus zur Grundlage des ganzen musikalischen Systemes machen dürfte.

Etwas abweichend von der in dieser Auflage meines Buches gebrauchten ist die von Herrn A. Ellis[1]) vorgeschlagene Bezeichnungsweise der natürlichen Stimmung für die gewöhnliche Notenschrift. Er braucht dabei nur zwei neue Zeichen, nämlich † für die Erhöhung des Tones um ein Komma $\frac{81}{80}$, und ‡ für die Erniedrigung durch dasselbe Intervall; dagegen bedeutet ♯ die Erhöhung um ein Limma $\frac{135}{128}$, und ♭ die Erniedrigung durch dasselbe Intervall. Die Noten ohne Versetzungszeichen *C, D, E, F, G, A, H* haben diejenigen Werte, welche ihnen in der natürlichen Stimmung von *C*-Dur zukommen wie auf S. 450.

Dann bekommt *G*-Dur, außer dem ♯ vor *F*, ein † vor *A*.

D-Dur bekommt dazu ein zweites ♯ vor *C* und ein zweites † vor *E*.

A-Dur (oder vielmehr † *A*-Dur) bekommt ein drittes ♯ vor *G* und ein drittes † vor *H*.

Man sieht leicht, wie dies in Quinten fortschreitend weiter geht.

Umgekehrt bekommt *F*-Dur, außer dem ♭ vor *H*, noch ein ‡ vor *D*.

B-Dur bekommt ein zweites ♭ vor *E* und ein zweites ‡ vor *G*.

Es-Dur ein drittes ♭ vor *E* und ein drittes ‡ vor *C* usw.

Die absteigende Molltonleiter von *A*-Moll unterscheidet sich von der *C*-Durleiter durch ein ‡ vor *D*. In der aufsteigenden Molltonleiter ist der Leitton zu *A* zu bezeichnen mit ‡ ♯ *G*, denn ♯ *G* ist der Leitton zu † *A*, wie sich vorher ergab, und ebenso ist ‡ ♯ *F* die Terz zu ‡ *D* zu nehmen. Die entsprechenden Vorzeichnungen sind an den übrigen Molltonleitern zu machen.

Für die Haupttonart werden die betreffenden † und ‡ an den Anfang jeder Zeile gesetzt wie die ♯ und ♭. Wo Modulationen eintreten, müssen sie vor die einzelnen Noten gesetzt werden.

Beilage XIX.

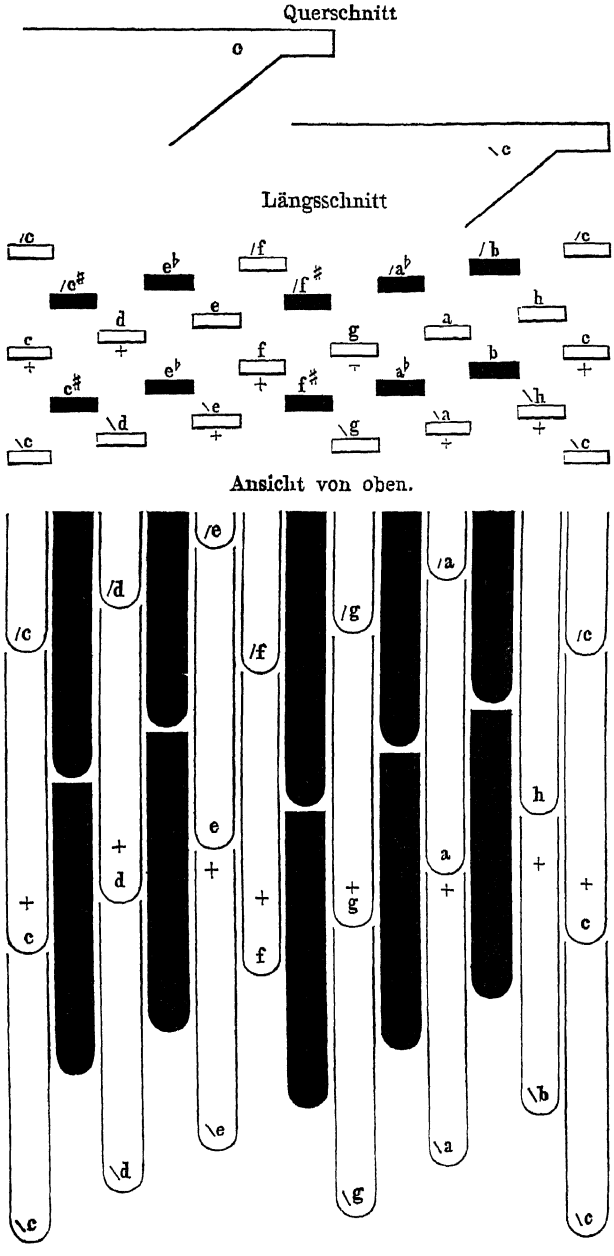
Plan von Herrn Bosanquets Manual.

Zu Seite 531.

Auf beistehender Fig. 66 ist die Anordnung eines Teiles dieses Manuals für 53 gleiche Tonstufen in der Oktave gegeben. Die oberste Abteilung zeigt den Längsschnitt zweier hinter- und übereinander stehender Tasten, die alle von gleicher Form und nur durch die Farbe unterschieden sind. Die mittlere Abteilung der Figur zeigt eine Vorderansicht der vorderen Enden dieser Tasten, die untere Abteilung die Ansicht von oben. Wenn man von einem der Töne, z. B. von *c*, nach rechts und gleichzeitig etwas nach hinten und nach oben steigend und je eine zwischengeschobene Taste überspringend nach *d, e* geht, so folgt dann weiter in großen Ganztönen fort-

[1]) Proceedings Royal Society, 1864, No. 90. (In der 2. Aufl. der Übersetzung nicht mehr benutzt. Vgl. daselbst S. 277.)

Fig. 66.


Querschnitt
c
\c
Längsschnitt
/c
/f
/h
/c
/a♭
/c♯
/f♯
h
e♭
e
d
a
g
c
b
c
f
e♭
a♭
c♯
f♯
\h
\e
\d
\a
\g
\c
Ansicht von oben.
/c
/d
/e
/f
/g
/a
/c
h
e
d
a
g
c
f
\e
\d
\a
\g
\b
\c

schreitend *fis*, *gis*, *ais*, endlich *his* oder / *c*. Das Zeichen / bedeutet, wie schon im Text bemerkt ist, Erhöhung um ein Komma $\frac{76}{77}$ und ist nahe gleichbedeutend mit dem von uns gebrauchten Horizontalstrich über den Noten. Zwischen diese Tasten schiebt sich die andere in Ganztönen fortschreitende Reihe *des*, *es*, *f*, *g*, *a*, *h*, *cis*.

Die gerade übereinander liegenden Reihen sind um je ein Komma in ihrer Stimmung verschieden, die oberen sind die höheren.

Durch Kreuzchen habe ich angezeigt, wie die *C*-Durleiter zu spielen ist. Man muß zwischen *e* und *f*, sowie zwischen *h* und *c* auf eine tiefer liegende Zwischenreihe absteigen. Aber jede Durtonleiter ist in ganz gleicher Weise zu spielen, mit welchem Ton man auch anfangen mag.

Das von Herrn Bosanquet konstruierte Harmonium hat für die 53 Töne der Oktave 84 Tasten, indem am oberen Rande des Manuals sich wieder Tastenreihen anschließen, deren Töne schon am unteren vorkommen, um nicht zu häufigerem Hin- und Herspringen zwischen oberem und unterem Rande gezwungen zu sein. Im System von 53 Stufen ist $/// h = \backslash\backslash c$, da fünf seiner engsten Tonstufen einen diatonischen Halbton ausmachen.

REGISTER.

Abdul-Kadir 458, 584.
Ägypten 444.
Äolische Tonleiter 403, 439, 440, 450.
Akkorde 348.
—, dissonante 534.
—, dreistimmige 360.
—, konsonante 470.
—, tonische 480.
—, vierstimmige 363.
Akkordfolgen 569.
d'Alembert 379, 456, 518.
Amboß 216.
Ambros 395, 427, 430.
Ambrosius von Mailand 398, 445.
Amplitude 55.
Antony 393.
Apperzeption der Empfindung 107.
Appogiatura 464.
Appun 30, 207, 295, 602.
Archytas 432, 584.
Aristoteles 390, 391, 395, 414, 439, 463.
Aristoxenus 435, 444.
Artusi 409.

Bach, Emanuel 519, 522.
—, Sebastian 356, 402, 480, 493, 519, 565, 580.
Barrow, John 429.
Basevi, A. 563.
Baßton 500.
Bausch 148.
Beethoven 344, 498, 529.
Bellermann 436.
Bernouilli 27.
Bessel 642, 645, 650.
Bitschurin 430.
Blasinstrumente 346.
Böotisch 440.
Boethius 422, 437
du Bois-Reymond 172.
Boltzmann 156.
Bosanquet 531, 532, 662.
Bourget, J. 126.
Brandt 92.
Brumel 480.

Caccini 409.
Cagniard la Tour 22.
Chladni 70, 123.
Chromatische Leiter 432.
Chrysanthus von Dyrrhachium 322.
Cornu 525.
Corti 228, 238, 239, 241, 242, 243, 277, 287, 295, 370, 639, 650, 651.
Coussemaker 399.
Curwen, J. 669.

Dehn 323.
Delezenne 525, 661.
Diaphonie 400.
Diatonische Leiter 432, 437, 443, 449; Abarten davon 434.
Didymus 372, 433, 436.
Differenztöne 254, 325.
Diskantus 400.
Dissonante Dreiklänge 542—547.
— Intervalle 535—542.
Dissonanz 320, 335, 553.
Dominante 27, 475.
Donders 117, 176, 177.
Doppelsirene 268, 291, 303.
Dorische Tonleiter 403, 433, 439, 451, 492.
Dove 23, 25, 269.
Dreiklänge, dissonante 542.
Duodezime 313, 420.
Durakkord 25, 359.
Durchgangstöne 564.
Durgeschlecht 450, 455, 476, 486.

Ekert 497.
Ellis 621, 662.
Engel, G. 180.
Enharmonische Leiter 426, 432, 435.
Esthen vermeiden Leitton 465.
Euklides 369, 442.
Euler 27, 375, 377.
Exner, S. 249.

Fagott 160, 163.
Farabi 458.
Fessel 199, 606.
Fétis 395, 399, 426, 444.
Flörke 176.
Flötenpfeifen 149, 338; Anblasen der 621.
Fortlage 497.
Fourier 56, 58, 614, 619, 627, 636.
Franco von Cöln 316, 323.
Fundamentalbaß 477.

Gabrieli, Johannes 406, 480.
Galilei 27.
Geigenprinzipal 156, 338.
Gemshorn 157, 339.
Geräusche 14, 116, 247–249.
Gerbert 322.
Glareanus 323, 403, 441, 446.
Glasstabharmonika 122.
Gleitz 125.
Glocken 124.
Goethe 111.

Goudimel, Claude 406.
Graham 427.
Gregor der Große 392, 446.
Grove 630.
Grundton 477.
Guadanini 146.
Guéroult, G. 274.
Guido von Arezzo 562.
Guitarre 128.

Händel 356, 402, 478, 496, 659.
Halbschluß 475.
Hallström 256, 647.
Hamilton 640.
Hammer im Ohr 213.
Hammer Purgstall 458.
Hanslick, E. 2, 413.
Harfe 128.
Harmonium 159, 162; reingestimmtes 512.
Hasse 238, 241.
Hauptmann 372, 452, 479, 485, 493, 502, 511, 536, 545, 557, 578.
Haydn 659.
Heidenhain 227.
Hellwag 176.
Helmholtz, H. 9, 153, 177, 190, 219, 253, 601, 606, 619, 632, 654.
Henle 239.
Henrici 106.
Hensen, V. 228, 238, 240, 246, 247, 639.
Hervert 156.
Holzblasinstrumente 162.
Holzharmonika 122.
Horn 164.
Hucbald 400.
Hypate 396, 397.
Hypodorisch 439, 450.
Hypolydisch 439.
Hypophrygisch 439, 450.

Interferenz 265.
Intervalle, dissonante 302.
—, konsonante 302.
—, Anwendung beim Gesang 658.
Ionische Tonleiter 403, 441, 450, 490.

Joachim 423, 525.
Jolis, A. le 465.
Jones 399.
Josquin 480.

Kehlkopf 161, 164.
Kepler 375.
Kiesewetter 389, 458, 460.
Kircher, Athanasius 375.
Kirchhoff 640.
Kirnberger 519.
Klang 13, 39, 97.
Klangfarbe 19, 31, 115, 165, 192.
Klangverwandtschaft 584.
Klarinette 160, 163, 346.
Klaviersaiten 609.
Knotenlinien 69.
Knotenpunkte 77.
König 34, 263, 276, 294, 600, 602.
Kombinationstöne 253, 325, 646, 647, 654.
Konfucius 374.
Konsonanz 304, 316, 320, 322, 335.
Kosegarten 458.

Labyrinth 213, 221.
Leibniz 107.
Leitton 461—469.
Lichanos 396, 397.
Lichaon 437.
Lippen als Zungeninstrument 161.
Lissajou 137, 166, 205.
Lokrisch 439.
Luther 405.
Lydische Tonleiter 403, 433, 434, 439, 450, 490.

Mach 156.
Mahmud Schirasi 458.
Marcello 398.
Marloye 153.
Marpurg 518, 519.
Matheson 519, 522.
Mayer, A. M. 652.
Membran 70, 125.
Membrana basilaris 225, 238, 636, 639.
Mendelssohn 659.
Mercadier 525.
Mercator 531.
Mese 395, 397.
Meshaka, Michael 434.
Mitschwingen und Ausschwingen 638.
Mittönen 60.
Mixolydisch 403, 439, 490.
Mixturregister 98, 158, 339.
Modulation, Regeln der 531—533.
Mollakkord 361; seine zweifache Klangbedeutung 479.
Mollgeschlecht 450, 477, 487.
Monochord 26, 128.
Monteverde, Claudio 409, 480, 555.
Mozart 356, 366, 482, 489, 497, 527, 565.
Müller, Johannes 6, 161, 243.
Muris, Jean de 323.
Musik, harmonische 405.
—, homophone 390.
—, polyphone 400.
Mysis 246.

Naumann 452, 509, 531.
Neef 199.
Neidhard 519.
Nete 397.
Neumann, Clemens 142.
Newton 27.
Nikomachus 422, 426, 437.
Notation für reine Stimmung 453.

Obertöne 37; Beobachtungsweise 84—89.
Oboe 160, 163.
Oettingen, A. v. 450, 465, 498, 586, 587.
Ohm, G. S. 38, 54, 92, 97, 100, 104, 105, 107.
Ohr 208.
—, Bau desselben 211.
Oktave 25, 28, 30, 313, 419.
—, verdeckte 579.
Oktavenparallelen 575.
Olivier 176.
Olympos 426, 432, 435.
Organum 400.
Orgel 159, 162, 577.
—, enharmonische 658.
Orgelpfeifen 149.

Orgelpfeifen, gedackte 149, 337.
—, offene 150.
Orpheus 422.

Palestrina 367, 406, 408.
Paramese 397.
Paranete 397.
Parhypate 396, 397.
Partialtöne 37; objektive Existenz 81.
Pauke 126.
Paul, O. 400.
Pedalharfe 520.
Peri, Jacob 392, 402, 409.
Periode d. Schallbewegung 15.
Perzeption des Empfindungseindruckes 107.
Pfeifen 157; Theorie der 619; Anblasen der 621.
Phasenunterschied 55, 194.
Philolaus 426.
Phonautograph 34.
Phonisches System (v. Oettingens) 587.
Phrygisch 403, 433, 439, 450, 492.
Phrynis 442.
Pianoforte 128, 343.
Pius IV. 406.
Pizzicato 128.
Plagalschluß 475.
Plato 447.
Playford 429.
Plutarch 432.
Politzer 222, 276.
Poole, H. W. 523, 532, 658.
Praetorius 518.
Preyer, W. 30, 242, 295, 298.
Prime 313.
Prinzipalregister 338.
Prinzipalstimmen 157.
Ptolemäus 373, 432, 434, 436.
Pythagoras 2, 7, 26, 374, 410, 433, 437, 455, 519, 584.

Quarte 25, 315, 331, 539, 542.
Quartengeschlecht 490.
Querstand, unharmonischer 580.
Quincke 606.
Quintalen 157, 339.
Quinte 25, 314, 331, 539, 543.
—, verdeckte 579.
Quintenparallelen 575.
Qvanten, E. v. 186.

Rameau 88, 170, 419, 456, 477, 500, 518, 555, 561, 569.
Reissner 225.
Resonator 73—75, 600.
Reyher 176.
Rezitativ 393, 397.
Riemann, H. 586, 650.
Ritualgesang 393.
Rohrflöte 158.
Romieu 381.
Rüdinger 223.

Saiten 77, 127; Mittönen derselben 79—83; Bewegung derselben 603.
Salicional 157.
Sauerwald 269.
Savart 147, 290, 293.
Schafhäutl 125.
Scheibler 29, 333, 370.
Schiedmayer, J. u. P. 512.
Schluß, vollständiger 476.
Schultze, Max 227.
Schwebungen 265; Schwankungen der Tonhöhe dabei 649; Intensität 650; ihre Zahl 653.
Schwingungen, einfache und zusammengesetzte 38, 49, 55.
Schwingungsdauer 15, 21.
Schwingungsform 36.
Schwingungszahl 21, 30.
Scott 34, 276.
Seebeck 21, 23, 100, 104, 105, 107, 166.
Seiler 170.
—, Frau E. 189.
Sekunde 541.
Septime 540, 541.
Septimenakkorde 547.
Septimengeschlecht 492.
Sexte 26, 315, 333, 525, 542.
Sextengeschlecht 494.
Silbermann 522.
Sinusschwingungen 39.
Sirene 21, 268, 291, 303, 600, 648.
Smith, H. 627.
Sol-Fa-Methode 659.
Sondhauss 601.
Sonreck 627.
Sorge 254, 381.
Spinelt 128.
Spitzflöte 157.
Stärke der Klänge 20.
Stefan 606.
Steigbügel 218.
Steinway 131.
Stimmgabel 33, 67, 121, 196, 198, 629, 630.
Stimmung, reine 516, 656, 658.
Stockhausen, J. 181.
Stokes 614.
Stradivario 147.
Streichinstrumente 137, 341.
Strohfiedel 122.
Summationstöne 254.
Sylvester, Papst 393.
Syntonoiastisch 440.
Syntonolydisch 440.

Tartini 106, 254, 379, 381.
Taylor 9.
Teiltöne 37.
Temperatur 504; ihre Nachteile 519.
Terpander 410, 426, 588.
Terz 25, 316, 332, 525, 542.
Terzengeschlecht 492, 543.
Tetrachord 421, 434.
Thompson, P. 523, 658, 660.
Toepler 156.
Ton 39, 97.
— durch Resonanz 606.
Tonalität 395, 412.
Tonarten 444; ihr verschiedener Charakter 502.
Tongeschlechter 441, 447.
Tonhöhe 20, 39, 98, 651.

Tonleiter 429, 438, 449; kirchliche 398, 403, 438, 445; fünfstufige 427—431; arabisch-persische 456—461.
Trite 397.
Trompete 164.
Tropen 399.
Tsay-yu 427.
Tso-kiu-ming 374.
Tyndall, J. 9, 627.

Unterdominante 27.
Untertöne, harmonische des Resonatortones 76.

Verwandtschaft der Akkorde 480.
— der Klänge 419.
Viadana 402, 409.
Vibrationsmikroskop 138, 205.
Villoteau 426.
Viola di Gamba 156.
Violinbaß 156.
Violinsaiten, Bewegung der 615.
Violoncell 156.
Vischer 3, 415.
Vitry, Philippe de 323.
Vokale 168; ihre Zusammensetzung 629.
Vorhaltsakkord 543.
Vorhaltsnote 464

Wagner, R. 544, 554.
Wahrnehmung (Apperzeption der Empfindung) 107.
Waldeyer 241.
Waller, R. 111.
Weber, W. 622.
Weitzmann 442.
Wellen 632; ihre Zusammensetzung 45.
Wellenbewegungen 16, 41.
Werckmeister 519.
Wertheim 601.
Westphal 436.
Wheatstone 168.
Wiedemann, G. 9.
Willis 168, 190.
Winterfeld 402, 446, 447, 465, 491.
Wölfe in der Stimmung 518.

Young, Thomas 89, 91, 244, 277.

Zamminer 106, 147, 164, 622.
Zarlino 404, 505, 526.
Zither 128.
Zungen 159.
Zungenpfeifen 159; Anblasen der 622.
Zusammenklang 39, 97.

Druckfehlerberichtigung.

Auf S. 395, 427 und 430 lies **Ambros** statt Ambrosch.

534.3 H47
Helmholtz, H. von
Die lehre von den

534.3 H47

Carnegie Institute of Technology
Library
PITTSBURGH, PA.

Rules for Lending Books:

1. Reserved books may be used only in the library until 8 P. M. After that hour they may be requested for outside use, due the following morning at 9:30. Ask at the desk about week-end borrowing privileges.
2. Books not of strictly reference nature, and not on reserve may be borrowed for longer periods, on request. **Date due** is stamped on date slip in book.
3. A fine of five cents an hour is charged on overdue reserve book. Two cents a day fine is charged on overdue unreserved books.

11-46

UNIVERSAL
LIBRARY

138 169

UNIVERSAL
LIBRARY