Max Planck Research Group
Epistemes of Modern Acoustics

Sound & Science: Digital Histories

Pisko, Franz. Die neueren Apparate der Akustik. Wien: Druck und Verlag von Carl Gerold's Sohn, 1865.

https://acoustics.mpiwg-berlin.mpg.de/node/666

Scan licensed under: CC BY-SA 3.0 DE | Max Planck Institute for the History of Science

MAX PLANCK INSTITUTE
FOR THE HISTORY OF SCIENCE

Die

neueren Apparate der Akustik.

Für

Freunde der Naturwissenschaft und der Tonkunst

von

Dr. Fr. Jos. Pisko,

Prof. der Physik an der Communal-Oberrealschule auf der Wieden und an der damit in Verbindung stehenden Gewerbeschule in Wien; ehedem Prof. der Physik und Mathematik am k. k. Gymnasium und an der mit der k. k. Oberrealschule verbundenen Gewerbeschule in Brünn.

Mit 96 in den Text aufgenommenen Holzschnitten.

WIEN.

Druck und Verlag von Carl Gerold's Sohn.

1865.

Vorwort.

Bei Durchmusterung der im Londoner Industriepalast (1862) aufgestellten physikalischen Gegenstände wendete ich mich immer wieder zu der eben so schönen als vollkommenen Sammlung akustischer Apparate des R. König in Paris.

Was die Schall-Lehre aus älterer und neuerer Zeit an werthvollen Instrumenten nach und nach erworben hatte, das fand der Beschauer hier beisammen.

Am meisten interessierten mich die Phonographen, so wie das treffliche, wohlgeordnete akustische Album mit Tonschriften von König.

Bei meiner nachmaligen Ankunft in Paris war einer meiner ersten Gänge zu dem Erzeuger jener vorzüglichen Instrumente. König, ein junger, höchst intelligenter Mann (Deutscher), nahm mich in der zuvorkommendsten Weise auf.

Hier hatte ich Gelegenheit viele der in London unter Glas ruhenden Instrumente in ihrer Thätigkeit zu sehen — und wieder zogen mich die Tonschreib-Vorrichtungen am meisten an. König war so freundlich, die Phonographen in meiner Gegenwart zu versuchen und später arbeitete ich selbst mit solchen.

Da die von König für die Vibrographie bestimmten Gabeln zugleich für die herrlichen akustischen Lichtversuche von Lissajous eingerichtet sind, so wiederholte ich auch diese.

Wenn mich die eben erwähnten Experimente am meisten beschäftigten, so blieb mir dennoch eine rege Theilnahme für die übrigen neueren akustischen Behelfe, wie sie König öffentlich vorführte. Sein Tonmesser nach Scheibler, seine Stäbe nach Terquem, seine Pfeife mit Flammenzeigern für den Nachweis der Knotenflächen und Bäuche, sein, wenn auch nur in einer Photographie ausgestellter Vocal-Apparat und seine Resonatoren nach Helmholtz, sein neuer Apparat zum Messen der Geschwindigkeit des Schalles auf kleinen Strecken nach Bosscha, sein Apparat für die Änderung des Tones bei bewegter Schallquelle nach Dr. Mach und noch vieles andere leiteten mich zu einer Arbeit, die ich hiemit dem Freunde der Naturlehre vorlege. Dieser erhält zunächst in den ersten zwei Capiteln eine Art Vorschule zu dem physikalischen Theile des Epoche machenden Werkes „die Lehre von den Tonempfindungen von Helmholtz“. Die neue, von Helmholtz gestützte Theorie des Klanges, seine treffende Erklärung der Consonanz und Dissonanz der Töne sowie des Combinationstones werden hier kurz und, wie ich hoffe, fasslich gegeben. Die Lectüre des classischen Werkes von Helmholtz dürfte dann dem Liebhaber der Physik um so leichter werden. Überdies findet er in den übrigen Capiteln organisch bei einander, was er erst in vielen Werken und zuweilen vergeblich suchen müsste. So sind die Nachrichten über die graphische Methode nur spärlich vorhanden. König's und meine Erfahrungen in dieser Beziehung mögen daher erwünscht sein. Die Apparate

für die parallele und rechtwinklige Combination bezüglich des schreibenden Verfahrens, der Membran-Phonautograph in seiner verbesserten Gestalt, das neue Wheatstone'sche Kaleidophon sowie dessen Versinnlichungs-Apparat dafür (beide ausgeführt von König) und noch andere Dinge werden hier eingehend erörtert. Diese Umstände werden selbst den Fachmann zum Durchblicken des Schriftchens bewegen. Jedenfalls wird ihm der literarische Nachweis von Nutzen sein. Der Lehrer der Physik ersieht aus dem Schriftchen schnell, mit welchen neueren Instrumenten seine akustische Sammlung zu ergänzen und wie die betreffenden Apparate zu handhaben seien; auch dürften ihm die vom Xylographen Herrn Switiroch in Wien mit dankenswerther Genauigkeit ausgeführten Holzschnitte angenehm sein. Gern hätte ich in ähnlicher Weise meine Wahrnehmungen bezüglich anderer Zweige der Physik in jener großartigen Industriehalle zu London mitgetheilt, aber ich konnte wegen Erfüllung meiner Berufspflichten dazu nicht die Zeit finden.

Die optische Sammlung von Duboscq aus Paris, die treffliche Zusammenfassung mikroskopischer Gegenstände seitens der französischen und englischen Mikroskopenverfertiger, die Ausstellung meteorologischer Gegenstände von französischen und englischen Meistern und des trefflichen Observatoriums zu Kew (bei London) und mehrere andere Vorlagen im Industrie-Tempel zu London verdienten insbesondere eine in's Einzelne gehende Anzeige. In Kürze habe ich jedoch diese und ähnliche Gegenstände in dem vom Herrn Dr. Prof. Joseph Arenstein (Wien 1863) herausgegebenen amtlichen österrei-

chischen Ausstellungsbericht (Classe XIII.) behandelt. Daselbst (Classe XXIX.) habe ich auch meine in London gemachten Erfahrungen über das öffentliche Erziehungswesen und seine Behelfe niedergelegt.

Der Verfasser.

Einleitung.

Die Wissenschaft, welche sich das Reich des Klanges zum Gegenstand ihrer Untersuchung und Forschung auserkoren, wurde in jüngster Zeit eines bedeutenden Umschwunges sowie einer beträchtlichen Bereicherung ihres Ideenkreises und ihrer Hilfsmittel theilhaftig.

Die Klangfarbe, bisher nur im Allgemeinen aus einer Verschiedenheit der entsprechenden Wellenform abgeleitet, ist glücklich und endgiltig durch das harmonische Zusammenwirken des Grundtones und seiner Obertöne erklärt. Je nach der Anzahl und relativen Stärke der letzteren wechselt die Farbe des Klanges, und wenn er musikalisch ist, bleibt der Unterschied ihrer Phasen ohne Einwirkung. Der Klang eines Tones ist also gleichsam ein Accord; der Ton ist in der Regel zusammengesetzt; ein einfacher Ton kommt in der Natur selten vor, er muss erst künstlich geschaffen werden; das Dasein der harmonischen Obertöne ist allgemein, zu ihrer Elimination gehören Kunstgriffe — eine Auffassung gerade entgegengesetzt von der bisherigen! Es war zwar schon Mersenne[1]) im J. 1636 bekannt, dass von derselben Saite gleichzeitig verschiedene Töne kommen können und Daniel Bernouilli[2]) gab 1753 eine Erklärung davon, indem er ein neues Princip, die „Coëxistenz der kleinen Oscillationen“ brachte und erhärtete, sowie überhaupt damals die verschiedenen Arten der Schwingungen in der „acuten Harmonik“ behandelt wur-

den. Gleichwol war es erst der Neuzeit vorbehalten das allgemeine Vorkommen der Obertöne zu entdecken und daraus die Klangfarbe abzuleiten.

Dem Genie eines Helmholtz ist es gelungen, diese Wahrheit in der überzeugendsten Weise theoretisch und erfahrungsmäßig darzuthun. Er zerlegte die Klänge in ihre Einzeltöne und setzte sie wieder aus letzteren zusammen in ähnlicher Weise, wie das weiße und zusammengesetztfarbige Licht zerlegt und wieder zu seinem ursprünglichen Zustand vereint wird. Freilich waren die Hilfsmittel hier ganz anderer Natur als in der Optik — ist ja doch das Object trotz aller Analogien ein verschiedenes! Das Auge gestattet ein gleichzeitiges Wahrnehmen der Einzeltöne (des Spectrums) eines aufgelösten Gesammtlichtklanges; das Ohr scheint diese Fähigkeit nur im beschränkten Maße zu besitzen und in der Regel bloß, wenn die Klangfarben von verschiedenen Instrumenten ausgehen — wie es wol käme, wenn wir nicht von Jugend an gewöhnt wären, die Klänge auf die sichtbaren Tonquellen zurückzubeziehen? Das Schallgebiet scheint überhaupt nur Farben und nicht wie das Licht auch ein Weiß zu besitzen. Und die Zerlegung dieser Klangfarben erforderten andere Behelfe als die Lichtanalyse („Resonatoren", mittönende Membranen und Saiten); die Einzeltöne eines Klanges konnten nur in der Zeit nach einander ermittelt werden, außer es wurde auch das Auge zu Hilfe gerufen. (Reihe objectiver Resonatoren pag. 203.) Bei der Zusammensetzung der Klänge aus den einfachen Tönen konnte Helmholtz sogar unsere Vocale entstehen lassen (Vocal-Apparat). Die letzteren unterscheiden sich von den anderen Klangfarben dadurch, dass einem jeden Vocal ein bestimmter Ton entspricht, welcher stets an Stärke mächtig vorherrscht in dem Gemisch von Tönen — der den Vocal constituierende Grundton, mit dem der Vocal gesprochen oder gesungen wird, mag welcher immer sein.

Und dieser kräftigste oder „charakteristische" Ton ist jener, auf den die Mundhöhle beim Aussprechen oder Singen des Vocals abgestimmt ist. Bei den anderen Klängen hingegen nimmt die Stärke der Obertöne ab, je höher ihre Ordnungszahl

ist. Wenn es dem Ohr auch schwierig wird, die Einzeltöne eines Klanges gleichzeitig gesondert zu empfinden, so vermag es doch nach längerer Übung und bei erhöhter Aufmerksamkeit ohne künstliche Nachhilfe jeden Theilton eines Klanges vereinzelt herauszuhören. Helmholtz schließt hieraus, dass jede Einzelfaser des Gehörnerven für die Wahrnehmung eines besonderen Tones gestimmt sein möge und stellt sich den ganzen Vorgang des Hörens auf ähnlichen Grundsätzen beruhend vor, nach welchen die Resonanz erfolgt. Das bisher räthselhafte „Cortische Organ“ (pag. 31) in der Ohrschnecke findet in solcher Weise eine treffliche Erklärung; es ist gleichsam ein „Clavier im Ohr“, dessen Saiten beim Ansprechen durch den gleich hohen Ton mit derselben Schwingungszahl erklingen. Es hat sich hier gezeigt, von welcher Wichtigkeit die bis jetzt nur für „interessant“ gehaltenen harmonischen Töne geworden sind, nicht anders steht es mit den „Stößen“ bei der Tonschwebung. Auch sie wurden wenig beachtet und es wäre vielleicht in noch geringerem Grade geschehen, hätte man ihrer nicht zur Erklärung des Combinationstones bedurft — jetzt sind die „Stöße“ in den Vordergrund gerückt. Mit ihrer Hilfe kann ein musikalisch ungebildetes Ohr die feinste Stimmung zu Wege bringen (§. 71); mit ihrer Hilfe lässt sich die absolute Schwingungszahl eines Tones auf das genaueste finden (§. 72); mit ihrer Hilfe lässt sich zeigen, dass die Bewegung der Tonquelle auf die Tonhöhe von Einfluss ist (pag 224). Die „Stöße“ endlich bieten den wahren Grund zur Erklärung der Consonanz und Dissonanz (pag 41).

Während die „Stöße“ sich zu einer kaum geahnten Geltung aufschwangen, verloren sie gerade da, wo sie früher bedeutend waren — sie werden, auch wenn sie schneller auftreten, nicht zum Combinationston. Dieser entsteht, wenn die von zwei Tönen gleichzeitig erregten Schwingungen so weite Elongationen besitzen, dass sie nicht mehr als verschwindend klein angesehen werden können. Die Folge hievon sind dann Vibrationen der Luft oder wenigstens der Gehörknöchelchen, welche den Combinationston erzeugen.

Diese mathematisch basierte Theorie von Helmholtz besitzt das erfreuliche Merkmal einer guten Hypothese, dass sie nicht nur die bisnun bekannten Combinationstöne, welche tiefer als jeder der primären Töne waren, genau erklärt, sondern dass sie sogar das Vorhandensein einer noch unbekannten Classe von Combinationstönen, d. i. solcher, welche höher als die erregenden Töne sein sollten, im voraus anzeigte! Und zu deren Erzeugung gab Helmholtz die zweckmäßigsten Instrumente (vielstimmige Sirenen, Physharmonika). Wie die „Stöße" wurde noch ein anderer, früher wenig beachteter Gegenstand einer verdienten Aufmerksamkeit gewürdigt; es betrifft dies Abbildung der Schwingungen. Bis vor kurzem wurden nur die ruhig gebliebenen Stellen an den tönenden Körpern ersichtlich gemacht und studiert — die Knotenlinien (Klangfiguren); die Wellenbewegung an den tönenden Körpern hingegen war nur vorübergehend Schaugegenstand; man gab sich wenig Mühe ihre Formen genau und bleibend vor das Auge zu bringen und sie eingehend kennen zu lernen. Jetzt ist auch dies anders. Die zitternden Stellen eines tönenden Körpers werden mit einem Federchen versehen und schreiben die Form und Anzahl ihrer Schwingungen bezogen auf eine Zeiteinheit auf (Vibrographie, Phonautographie). Die Luftwellen lässt man auf empfindliche, gespannte Häutchen wirken, welche das Schreibstielchen tragen. Dies wird anderseits zu einem erneuten Studium der Mitschwingungsfähigkeit der Membranen führen. Die mittelst der Phonautographie hervorgehenden Tonschriften sind von wunderbarer Regelmäßigkeit und können mit Hilfe eines objectiven photoelektrischen oder Sonnen-Mikroskopes einem grossen Publicum vorgeführt werden (pag. 89, Nr. 5).

Auch in noch anderer Weise ist Ähnliches möglich: Der tönende Körper wird an einem Puncte spiegelnd gemacht und wirft nun kräftiges Licht auf einen weißen Schirm zurück, wobei die Wellenformen ersichtlich werden. Bei diesem Verfahren bleibt zwar kein Merkmal wie bei der Tonschreibekunst von der Undulation zurück, aber die Wellenlinien treten deutlicher auf, weil ja wie beim Gauss'schen Magnetometer

der Lichtstrahl gleichsam den weit ausgestreckten Schreibstiel bildet und der Bogen des Ausschlagens wie bei einem sehr langen Pendel mächtig vergrössert wird. Und wenn der so zurückgeworfene Lichtstrahl auf einen zweiten tönenden Körper fällt, dessen Vibrationen zu jenen am ersten Körper unter rechten Winkeln erfolgen, so zeigen sich auf der weißen Tafel, wohin man den Lichtstrahl vom zweiten spiegelnden Körper leitet, die herrlichsten, regelmäßigsten Lichtcurven (Lissajous'sche Figuren). Bei einem bestimmten Tonverhältnis der vibrierenden Körper gibt die leuchtende Figur nicht nur dasselbe durch die Wiederkehr der gleichen Form sicher an, sie thut mehr, sie verräth auch den Phasenzustand beider Töne und durch die Anzahl der Scheitel nach wagrechter und lothrechter Richtung sagt sie auch den „Zähler" und „Nenner" des Intervalles (pag. 109, Note 1). Wie in jenen alten Tagen erscheint also mit feuriger Schrift auf weißer Wand: *„MENE, MENE — TEKEL — UPHARSIM"* („gezählt, gewogen und getheilt") — wenn auch hier minder bedrohlich und in anderem Sinne als ehedem. In der That die geringste Änderung der Schwingungszahl oder des Gewichtes an den vibrierenden Körpern, die mindeste „Theilung" oder Störung des Einklanges — und die Lichtzeichen an der Wand geben es auf das schärfste kund (pag. 108). Dies geht so weit, dass selbst ein Tauber auf das genaueste in dieser Weise stimmen kann und dass Frankreich die verkäuflichen Stimmgabeln amtlich auf diesem Wege prüfen lässt. Diese Lichtfiguren von Lissajous, immer und immer begegnen wir ihnen wieder, beim Kaleidophon (pag. 111), bei den Saitenschwingungen (§. 69) und sie stehen in fester Beziehung zu den Tonschriften (pag. 110, Note 3). Die lichtspiegelnden Vibrationsstellen sind also von der größten Wichtigkeit für das Studium der Schall-Undulation geworden. Aber auch noch in anderer Weise hat sich die Wissenschaft vom Schalle das Licht dienstbar gemacht. Um den Zustand der Dichte in den Luftwellen zu prüfen, drücken letztere auf Membranen, welche den Zufluss des Leuchtgases nach kleinen Brennern mehr oder weniger hemmen und dadurch ein „Vi-

brieren der Flammen“ bewirken. Und so werden Letztere eine Art Manometerzeiger! Überdies helfen dann rotierende Spiegel das Phasen- und Zahlenverhältnis der betreffenden Pfeifentöne weiter untersuchen (§. 90). Und wo die Flammen wegen der Natur des tönenden Körpers den Dienst versagen, etwa bei tönenden Glasstäben, da muss das „polarisierte Licht“ helfen. Die Verdichtungen und Verdünnungen an den Knotenpuncten eines longitudinal schwingenden Glasstabes werden durch Aufleuchten dieser Puncte beim verdunkelndgestellten Polarisations-Apparat verrathen (pg. 252). Die Knotenlinien transversal schwingender Glasstäbe zeigen das entgegengesetzte Verhalten (pg. 255). Die Glasstäbe, wenn sie tönen, brechen also an gewissen Stellen das Licht doppelt. Während in solcher Weise die schwingenden und zum Theil auch die ruhenden Stellen unter Herbeiziehung optischer Hilfsmittel untersucht wurden, blieben die älteren, wichtigen „Klangfiguren“ nicht vernachlässigt. Sind sie doch eigentlich auch ein optischer Behelf, direct für die ruhenden, indirect für die schwingenden Stellen! Es ist nun nachgewiesen, dass die Klangfiguren aus dem gleichzeitigen Auftreten zweier oder mehrerer Unison-Töne an den Platten entspringen und dass es nicht möglich ist, einen dieser Töne vereinzelt in der Platte zu erzeugen. Jeder dieser Töne versetzt die Klangplatte in transversale Schwingungen, aber dies nach verschiedenen Richtungen und so, dass jeder Ton, wenn er für sich allein, ohne die anderen Unison-Töne erregt werden könnte, an der Platte nur parallele und gerade Knotenlinien hervorrufen möchte. Wegen der immer stattfindenden Coëxistenz dieser Unison-Töne entsteht eine resultierende Klangfigur, die man im voraus construieren kann (pag. 167), und damit sind wir der mathematischen Behandlung nahe gerückt. Wie in den Klangplatten nie ein Transversalton ohne den anderen unisonen Transversalton zu erscheinen vermag, so verhält es sich mit Stäben, deren Maße so gewählt sind, dass sowol ihre transversalen als longitudinalen Vibrationen nahezu den nämlichen Ton geben. Auch an solchen Stäben ist es unmöglich, einen der

beiden Töne isoliert hervorzurufen; stets sind beide da, man mag den Stab transversal oder longitudinal erregen, und der ganze Stab geräth dann in eine Vibration, welche der Resultierenden dieser gleichzeitig wirkenden Schwingungsarten entspricht. Eine derartige Coëxistenz eines longitudinalen und transversalen Tones tritt häufig auch noch ein, wenn die beiden Töne um eine Octave verschieden sind (Terquem's Stäbe §. 74). Ich halte dies für eine Renonanz im eigenen Körper. Gerathen doch unter denselben Bedingungen fremde Körper in's Mitschwingen, das verbindende Medium mag von welcher Aggregationsform immer sein.

Die „Resonanz" spielt überhaupt in der neueren Akustik eine Hauptrolle. Sie liefert die Mittel zur Klanganalyse und Klangsynthese, und ohne dieselbe wäre ein überzeugender Beweis von dem allgemeinen Dasein der Obertöne gar nicht möglich.

Die hohe Empfindlichkeit der Körper für Töne, die in ihrer Stimmung liegen, haben neuerdings die schönen Versuche mit den „singenden Flammen" vom Grafen Schaffgotsch gezeigt (§. 89). Die „gehorsamen Flammen" (pag. 174) sind ein Resonanz-Phänomen und eine nützliche Anwendung davon sehen wir bei den objectiven Flammen-Resonatoren (pag. 203, Fig. 91), wo abermals das Ohr durch das Auge vertreten ist.

Die Wissenschaft vom Schalle hat für ihre Zwecke nicht nur beim Lichte geworben, sie hat auch Erfahrungen im Gebiete des Galvanismus zu ihrem Dienste ausgehoben. Stimmgabeln, welche zwischen den Polen hufeisenförmiger, intermittierender Elektromagnete aufgestellt sind, werden von letzten gleichzeitig erregt und längere Zeit in Schwingung erhalten. Die Selbstunterbrechungen des galvanischen Stromes besorgt eine nach dem Principe des Neef'schen oder Wagnerschen Hammers eingeschaltete Stimmgabel. Derartig elektromagnetisch regulierte Stimmgabeln haben beim Vocal-Apparat (§. 11), beim Vibrations-Mikroskop (pag. 245) und beim Apparat zur Messung der Schallgeschwindigkeit auf kleinen

Strecken (pag. 207) Anwendung gefunden. Die Erregung von Tönen mittelst der Wärme und Elektricität ist bekannt genug, und so sehen wir auch hier, dass keine Disciplin der Physik mehr isoliert bestehen kann. Sie alle werden einst zu einer einzigen, gut gekannten Bewegungslehre zusammenschmelzen. Haben wir doch oben (pg. XII) vernommen, dass ein Glasstreifen beim Ertönen doppelt lichtbrechend wird (vergl. pag. 255). Ein Theil der mechanischen Kraft wurde also hiebei in Licht umgesetzt; auch hier wie überall gilt das Gesetz von der Erhaltung der Kraft[3]).

Die

neueren Apparate der Akustik.

I.

Resonatoren und Vocal-Apparat nach Helmholtz.

(Analyse und Synthese des Klanges.)

1. Haupteigenschaften des Klanges. Wie bekannt, nennt man den Schall, wenn er aus schnellen, periodisch erfolgenden Bewegungen der kleinsten Theilchen des schallenden Körpers herstammt, Klang. Gehen die betreffenden Bewegungen nicht periodisch vor sich, so heißt der Schall ganz im Allgemeinen „Geräusch". Das Geräusch erhält dann, je nach der Eigenthümlichkeit, verschiedene Namen.

An jedem Klange unterscheiden wir:

a) Seine Stärke oder Intensität, welche mit der Weite (Breite, Amplitude) der Schwingungen der Theilchen des schallenden Körpers zunimmt.

b) Seine Höhe (Tonhöhe, Tonalität), welche der Schwingungsdauer umgekehrt und der Schwingungszahl geradezu proportional ist.

c) Seine Klangfarbe (Klangeigenthümlichkeit, Qualität des Klanges), welche von der Form oder Figur der Luftwellen, innerhalb jeder einzelnen Schwingungsperiode, abhängt. Der experimentelle Beweis hiefür wurde erst in neuester Zeit von Helmholtz geliefert. Früher wurde auf diese Wahrheit nur dadurch geschlossen, weil kein anderer Ausweg zur Erklärung der verschiedenen Klangfarben übrig blieb, indem die quantitativen Elemente der Schwingungsbewegung nur die Stärke und Höhe des Tones nachgewiesenermaßen abzuändern vermögen. Einem jeden Klang, welcher qualitativ von einem anderen unterschieden ist, entspricht eine ihm eigenthümliche Schwingungsform. Verschiedene Schwingungsformen

können jedoch zusammen als Resultirende gleiche Klangfarben bieten, in ähnlicher Weise, wie mannigfaltige Componenten eines Kräftenparallelogrammes dieselbe Diagonale zur Resultirenden haben können.

2. *Näheres über die Klangfarbe.* *a*) Grundton und Oberton. Die Klänge der Saiten und der musikalischen Instrumente sind aus Tönen zusammengesetzt, welche zu einander in dem Verhältnisse wie $1:2:3:4\ldots:n$ stehen. Alle diese Töne erklingen auf einmal und man glaubt einen einzigen oder einen einfachen Ton zu hören und zwar von der Höhe des „Grundtons" mit der Verhältniszahl 1, d. i. des tiefsten aller dieser Töne. Und dies daher, weil der Grundton am stärksten ist.

Die höheren Töne (mit der den Schwingungen entsprechenden Verhältniszahl $2, 3, \ldots n$), welche diesen Ton begleiten, heißen Obertöne des betreffenden Grundtons.

b) Die Klangfarbe. Von der Höhe, Stärke und Anzahl der dem Grundtone beigemischten Obertöne hängt eben die Eigenthümlichkeit des Klanges oder die „Klangfarbe" ab.

c) Partialtöne. Sowol der Grundton eines Klanges, als jeder den Grundton begleitende höhere, schwächere, harmonische Ton oder der Oberton heißt einzeln: „Theil- oder Partialton". Der „tiefste Partialton" oder der „Grundton" gibt also den Ausschlag, wenn man ein musikalisches Instrument stimmt. Er ist der erste Partialton. Der 2., 3., 4. ....n. Partialton machen in einer Secunde 2, 3, 4 ...n mal mehr Schwingungen, als der Grundton; sie sind (wie schon besprochen wurde) die „harmonischen" Obertöne des Grundtones, und zwar entspricht dem 2., 3., 4. ..... $(n+1)^{\text{ten}}$ Partialton der 1., 2., 3. .... n^{te} Oberton.

1. Durch die Klangfarbe unterscheiden sich z. B. die gleich hohen Töne einer Flöte von den gleich hohen Tönen einer Violine, einer Clarinette u. s. w.

2. Die eigentlich musikalischen Klänge sind immer von harmonischen Obertönen begleitet.

3. Klänge ohne Obertöne werden von Stimmgabeln gegeben, welche vor der Öffnung einer ziemlich weiten Röhre tönen. Die Maße einer solchen „Resonanzröhre" müssen so genommen sein, dass ihr tiefster

Eigenton gleich dem Grundton der Stimmgabel ist. Da nämlich die höheren Eigentöne der Stimmgabel andere sind als die höheren der Resonanzröhre, so wird nur der Grundton der Gabel durch den stark mittönenden Grundton der Röhre gekräftigt und die Obertöne beider bleiben daher ungehört. Es ist also der Zusammenklang beider für das Ohr so gut wie einfach.

4. Auch bauchige Flaschen angeblasen, ertönen ohne Obertöne. Solche einfache Töne sind sehr weich, und man könnte sie leicht für tiefer halten, als sie wirklich sind.

5. Klänge mit unharmonischen Obertönen geben Stimmgabeln auf Resonanzröhren, die Glasharmonika, Metallscheiben, Glocken und gespannte Membranen, wenn sie zum Tönen gebracht werden. Im strengen Sinne sind ihre Klänge nicht musikalisch, sie werden daher auch selten in der Musik verwendet und stets nur so, dass ihr Grundton die Ober- oder Nebentöne sehr bedeutend an Stärke überwiegt.

3. Theorie und Geschichtliches bezüglich der Klangfarbe.

a) Das Gesetz, nach welchem das Ohr die Analyse eines Klanges in einzelne Töne vornimmt, lautet nach G. S. Ohm: Jede einer zusammengesetzten Klangmasse entsprechende Luftschwingung wird in eine Anzahl einfacher, pendelartiger Schwingungen zerlegt. Jeder solchen pendelartigen Schwingung entspricht ein Ton, den das Ohr empfindet und dessen Höhe durch die Schwingungsdauer der zugehörigen Luftschwingung bestimmt wird. Die pendelartigen Luftschwingungen, welche sich in ihrer Amplitude und Dauer der Periode unterscheiden, lassen sich zu den mannigfaltigsten Schwingungsformen zusammensetzen. Schon Fourier hatte streng mathematisch gezeigt, dass eine jede beliebige Schwingungsweise und Schwingungsform sich als die Summe vieler, pendelartiger Schwingungen betrachten lasse.

Dem Gehörten zufolge geben einfache pendelartige Schwingungen der Luft einen „Ton“. Beliebig geformte Schwingungen der Luft, entsprechend vielen einfachen Tönen, geben den „Klang“.

Die Zerlegung eines Klanges in eine Summe von Tönen, oder einer beliebigen Schwingungsform in eine bestimmte Anzahl einfacher, pendelartiger Schwingungen war von jeher die beliebte Anschauung der Mathematiker und es entsteht die

Frage: Haben die Theiltöne nur in der Theorie Bedeutung, oder existieren sie in Wirklichkeit?

Wie schon erwähnt, war es G. S. Ohm, der das Gesetz aussprach, dass das Ohr des Menschen nur eine pendelartige Luftschwingung als einfachen Ton auffasse, dass es aber stets die Klänge (zusammengesetzten Töne) in einzelne Töne auflöse. Seebeck war der Ansicht, dass der einfache Ton durch verschiedene Formen der Luftschwingung hervorgerufen werden könne. Er bestritt daher den Ohm'schen Satz mit vielem Scharfsinn und vortrefflicher Sachkenntnis, jedoch mit Unrecht, wie Helmholtz[1]) neuestens gezeigt hat. Die Schwierigkeit, die Obertöne zu hören, besteht eigentlich nur darin, sich dieselben gesondert zum Bewusstsein zu bringen. Wir werden später die entsprechenden Mittel hiefür kennen lernen. Manche Beobachter, wie z. B. Brandt[2]), vermögen jedoch die Theiltöne ohne künstliche Nachhilfe direct zu unterscheiden und zwar genau so, wie es das mathematische Theorem von Fourier erfordert.

Ja zuweilen kann man die den Obertönen entsprechenden Wellenlinien noch an den Tonschriften (siehe Capitel III) beobachten. Die Partialtöne der menschlichen Stimme, obschon am schwierigsten zu unterscheiden, hat schon (1726) Bameau[3]) erkannt. In jüngster Zeit nahm Garcia öfter in einem gesungenen Klange die Octave und die Quinte der Octave sehr deutlich wahr.

Newton und Taylor legten den Grund zur mechanischen Theorie der tönenden Schwingungen. Sie nahmen als Fundamental-Bewegung die unendlich kleinen Pendelschwingungen an, und zwar basierten sie ihre Betrachtungen auf die Formel $v = a \cos (nt + \tau)$, wo v die Schnelligkeit der vibrierenden Theilchen, a eine constante Längengröße, n die Anzahl der Schwingungen für die Zeit 2π, t die zur Schwingung gebrauchte Zeit und τ eine constante Zeitgröße bedeuten. Sie entzogen sich dadurch der Schwierigkeit, Gleichungen zwischen drei veränderlichen Größen zu behandeln. D'Alembert, Euler und Lagrange thaten später dar, dass diese Annahme in zu engen Grenzen gefasst sei, und dass jede schnelle, regelmäßig periodische Bewegung einen Ton zu erzeugen vermöge. Daniel Bernouilli nahm die oben gegebene Formel wieder auf und leitete aus der Summe solcher Formen

die unendlich mannigfaltigen Bewegungen der Saiten her. Endlich zeigte Fourier streng, allgemein und mathematisch genau: Jede tönende Schwingungsform lasse sich durch Reihen der Sinus- und Cosinusfunctionen genau ausdrücken. Die Verrückung und die Geschwindigkeit der schwingenden Theilchen ist durch die Form: $a \sin 2\pi \frac{t+\tau}{T}$ mathematisch gegeben, wo a die Schwingungsweite, T die Dauer einer ganzen Schwingung, τ eine Constante bedeuten, welche die Anfangs-Phase bestimmt ($t = o$) bedeuten. Für die Obertöne führt man in die letzte Formel statt 2π nur $2n\pi$ ein, wo n die Anzahl der Töne bezeichnet. Der „Klang" kann demnach als ein Gemisch einfacher, verschieden hoher und verschieden starker Töne aufgefasst werden, als eine Summe mathematischer Ausdrücke der letzten Formel, bei welchen a, n und τ von verschiedenem Werthe sind.

b) Fassen wir zusammen: Man nennt nach Helmholtz einen „Ton" eine einfache Empfindung, welche durch eine einfache, pendelartige Luftschwingung erzeugt wird. Die „Höhe" eines Tones ist durch die Anzahl gleicher Perioden für je eine Zeitsecunde gegeben. Während einer solchen Schwingungsperiode machen die Lufttheilchen den nämlichen Hin- und Hergang, wie der Schwerpunct eines bewegten Pendels bei einer sehr kleinen Schwingung.

Die zusammengesetzte, gleichzeitige Empfindung mehrerer einfacher Töne, welche durch die von einer einzigen Schallquelle herrührende Luftschwingung hervorgebracht wird, heißt „Klang".

Unter Tonhöhe eines „Klanges" werden wir von jetzt an die Höhe des tiefsten darin enthaltenen Tones (seines „Grundtones", ersten Tones) verstehen. Die anderen beigemischten Töne werden wir seine „Obertöne" nennen.

4. *Resonatoren von Helmholtz.* *a*) Um die Klänge bezüglich ihrer Partialtöne zu analysieren, hat Helmholtz das Gesetz des Mitschwingens oder der „Resonanz" angewendet. Bekanntlich gerathen Saiten, Membranen, Luftmassen u. dgl. m. leicht in's Mitschwingen oder gar in's Mittönen, wenn sie mit dem ursprünglich er-

Fig. 1.



Fig. 2.

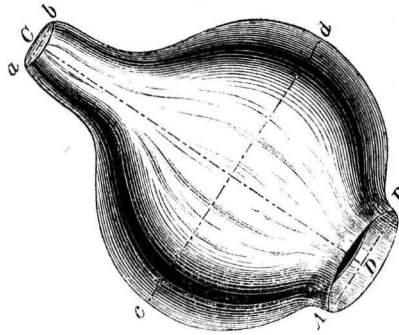
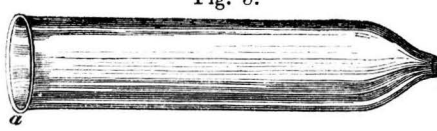


Fig. 3.



regten Ton vollkommen gleich gestimmt sind, oder, wenn sie auf die ersten Obertöne des erregenden Tones gestimmt sind. In letzterem Falle ist aber die Resonanz viel schwächer als bei der genau gleichen Stimmung. Besonders gut gerathen abgeschlossene, auf einen bestimmten Ton bemessene Luftmassen durch den zugehörigen Ton in's Mitschwingen oder in Resonanz. Hierauf beruhen im Wesentlichen die „Resonatoren von Helmholtz[4])". Es sind dies (Fig. 1 und 2) nahezu kugelförmige, oder (Fig. 3) röhrenförmige Hohlkörper aus Glas (Fig. 1 und 2) oder Blech (Fig. 2) mit einer kleineren und einer größeren Öffnung, welche längs einer Geraden (Axe) die entgegensetzten Enden bilden. Die kleine Öffnung *a* (Fig. 1) wird in den Gehörgang eingeführt und soll nach Möglichkeit denselben gut verschließen. Die von dem Resonator umschlossene und durch das Trommelfell des Ohres abgegrenzte Lichtmasse soll von einem bestimmten Tone zum Mitschwingen gebracht werden. Der Resonator muss daher durch Tatonniren bei seiner Anfertigung für den gewissen Ton abgestimmt werden.

Jeder Resonator ist also auf einen gewissen Ton gestimmt, oder jeder Resonator hat seinen „Eigenton". Legt man einen Resonator mit der kleinen Öffnung in den Gehörgang, so, dass dieser gut verschlossen ist und verstopft man gleichzeitig das andere Ohr sehr wohl, so werden die meisten Töne der gesprochenen Worte oder einer gesungenen Arie u. dgl. m. viel schwächer als sonst gehört. So oft aber unter den erregten Tönen der Eigenton des Resonators enthalten ist, vernimmt man diesen auffallend stark, er schlägt mit großer Kraft

gellend in's Ohr — eben weil dann gleichzeitig die auf diesen Ton abgemessene Luftmenge mitschwingt und denselben verstärkt. Es lässt sich mathematisch nachweisen, dass diese Verstärkung nur dann eintreten kann, wenn man eine Zerlegung der Schwingungen der äußeren Luft sowol als jener im Resonator in pendelartige Schwingungen voraussetzt und wenn unter den zur äußeren Luft gehörigen pendelartigen Schwingungen eine enthalten ist von der nämlichen Schwingungsdauer, welche den pendelartigen Schwingungen der Luft im Resonator zukommt.

b) Aus dem Gehörten folgt, dass die Resonatoren nicht nur für den Grundton, sondern auch für den Oberton eines Klanges ihre Dienste thun werden. Letzteres dann, wenn der „Eigenton" des Resonators mit dem entsprechenden Oberton einerlei Höhe hat.

c) Die Resonatoren haben zwar auch „höhere Eigentöne" (Obertöne). Diese sind jedoch viel schwächer und schwer zu erregen, so dass eine Verwechslung mit dem „Grundeigenton" des Resonators, also auch eine Irrung bezüglich des zu entdeckenden Tones nicht zu fürchten ist.

5. Nutzen der Resonatoren. Durch Anwendung einer abgestimmten Reihe von Resonatoren kann ein völlig musikalisch ungebildeter und selbst harthöriger Forscher an akustische Studien gehen, bei welchen einzelne schwache Töne, die durch eine Anzahl gleichzeitig auftretender stärkerer Töne verdeckt sind, wahrgenommen werden sollen. Dies ist besonders bei den Untersuchungen über die Ober-, Combinations- und Accordtöne der Fall.

1. Hat man einen Resonator dicht anschließend in das eine Ohr eingeführt und das andere Ohr gut verstopft, so schmettert aus einem angehörten vielstimmigen Musik- oder Gesangsstück jener Ton mächtig in das bewaffnete Ohr, welcher der „Eigenton" des Resonators ist.

2. Hat man einen auf den Ton f^1 abgestimmten Resonator ins Ohr entsprechend gut gesetzt und singt nacheinander die Vocale auf die Note B, so hört man den Eigenton f^1 (d. i. den dritten harmonischen Ton von B) des Resonators beim Vocal *e* mächtig und schmetternd, bei *o* und *ö* noch ziemlich stark, bei den übrigen Vocalen und ihren Erhöhungen aber nur schwach.

3. Selbst in den unregelmäßigen Schallerscheinungen, d. i. in den Geräuschen (Gepolter, Sausen, Lärm etc.) kann man mittelst Resonatoren die ihrem Eigenton entsprechenden Töne entdecken.

4. Ist der durch einen Resonator gesuchte Ton gegen die ihn begleitenden Töne sehr schwach, so lässt man den Resonator nicht ununterbrochen am Ohr, sondern gebraucht ihn intermittierend. Beim jedesmaligen Einlegen des schmäleren Resonatorendes in den Gehörgang wird dann der vorhandene fragliche, schwache Ton vernommen werden. Wird auch bei diesem Verfahren der gesuchte Ton nicht wahrgenommen, so existiert er eben nicht in dem analysierten Klange.

5. Die bestimmten Töne, welche man zuweilen mittelst an das Ohr gehaltener Muscheln oder Röhren im Tagesgeräusch vernimmt, finden so ihre Erklärung [5]). Die entsprechenden Muscheln und Röhren sind die Resonatoren, welche die schwächeren im Geräusche enthaltenen Töne durch Mitschwingung der von ihnen umspannten Luftmasse verstärken.

6. Arten der Resonatoren. a) Bei den Resonatoren kommt es im Wesentlichen darauf an, dass ein abgemessenes Luftvolum bei einem bestimmten Tone in's Mitschwingen gerathe. Ihre Gestalt kann daher sehr verschieden sein, am tauglichsten ist jedoch die Kugelform. Die kugelförmig umschlossene Luft geräth für den „Grundeigenton" leichter als bei jeder anderen Form in's Mitvibrieren, während anderseits ihre „höheren Eigentöne" nur sehr schwach und selten auftreten. Die ersten Resonatoren verfertigte Helmholtz aus kugelförmigen Retortenvorlagen, bei welchen die eine Öffnung mit einem für das Ohr passenden Rohre versehen wurde. Die später von Helmholtz angewendeten gläsernen, kugelförmigen Resonatoren (Fig. 1) wurden von Herrn König [6]), Fabricant akustischer Apparate in Paris, geliefert.

Die in's Ohr einzuführende Röhre kann mittelst Guttapercha, Siegellack so belegt und die letzteren Hüllen nach der Öffnung des Ohres so geformt werden, dass letzteres gut geschlossen ist. Ebenso kann man für die zweite Ohrmündung einen genau schließenden Pfropfen aus Guttapercha oder Siegellack anfertigen.

b) Resonatoren von König, ausgestellt zu London 1862. Dass die Resonatoren auch röhrenförmig sein können (Fig. 2), ist bereits erwähnt worden. (§. 4.)

Herr König hat derartige Resonatoren aus Messingblech angefertigt, bei welchen sich die mitschwingende Luftmenge

vergrößern und verkleinern lässt, mittelst einer Verschiebung ähnlich wie bei den Fernröhren [7]). Indessen gibt auch Herr König der Kugelform den Vorzug. Seine aus starkem Messingblech angefertigten Resonatoren haben die in Fig. 2, dargestellte Gestalt. Das in's Ohr einzuführende konische Ende verläuft so, dass es sich jeder Ohrmündung genau anpasst.

1. Die Engländer bezeichnen bekanntlich die Töne wie wir; die Franzosen und Italiener aber mit *ut* (im Singen, um das harte *t* am Ende zu vermeiden mit „*do*"), *ré, mi, fa, sol, la, si,* entsprechend unserem *c, d, e, f, g, a, h.* Die Franzosen beginnen ihre Scalen mit dem 66 Doppelschwingungen entsprechenden $C = ut = ut_1$, $c = ut_2$, $\bar{c} = ut_3$, $\bar{\bar{c}} = ut_4$ u. s. w. Die tieferen Töne bekommen negative Zeiger z. B. $\underline{C} = ut_{-1}$, $\underline{\underline{C}} = ut_{-2}$. In Deutschland sind mehrlei Bezeichnungen üblich. Zunächst vom c mit 132 ganzen Schwingungen ausgehend bezeichnet man nach der Tiefe C, $\underline{C}$, $\underline{\underline{C}}$ schreitend und nach der Höhe gehend c, $\bar{c}$, $\bar{\bar{c}}$, $\bar{\bar{\bar{c}}}$.... oder beziehungsweise $C_{,,,}$, $C_{,,}$, $C_{,}$, c, c', c'', c'''.... oder C'''', C''', C'', c, c', c'' c''' oder C_2, C_1, C, c, c_1, c_2, c_3 oder endlich höchst zweckmäßig nach Sondhaus [8]) c^{-3}, c^{-2}, c^{-1}, c^0, c^1, c^2, c^3. Bei der letzten Bezeichnungsweise, welche vom kleinen $c = c^0$ ausgeht, sieht man in den vorkommenden Fällen nicht nur, wie bei den anderen deutschen Bezeichnungsweisen sogleich den Abstand von der c-Scale; sondern sie gibt zugleich in jedem Einzelnfalle die absolute Schwingungszahl des betreffenden Tones an, wenn man sich zu dem Exponenten die Basis 2 denkt und für den Namen des Tones seine Schwingungszahl aus der kleinen Octave setzt. So z. B. ist $c^{-3} = c \times 2^{-3} = c \times \frac{1}{2^3} = \frac{132}{8}$; ferner ist z. B. $c^3 = c \times 2^3 = 132 \times 8$ u. s. w. Da diese Bezeichnungsweise in so directer Beziehung zur absoluten Schwingungszahl steht, so werden wir sie in diesem Buche durchwegs anwenden.

2. Die Akustiker sind bezüglich des Werthes „einer Schwingung" nicht einig. Eine Partei lässt einen Hin- oder Hergang dafür gelten, eine andere einen Hin- und Hergang. Nach Letzteren wäre also ein Hin- oder ein Hergang nur eine halbe Schwingung. Wir werden einen Hin- und Hergang mit „Doppelschwingung" und einen Hin- oder Hergang mit „einfacher Schwingung" bezeichnen.

3. Die König'schen Resonatoren sind verlässlich gestimmt. Sie zeigen am Rande der weiteren Mündung das Zeichen *R. K.* (Rudolph König), ferner das Zeichen für den Eigenton z. B. ut_2 und die Nummer in der Resonatorreihe.

Herr König hatte größere und kleinere Resonator-Serien zu London (1862) ausgestellt. Die mir zu Gebote stehende Reihe König'scher Kugel-Resonatoren beginnt mit dem Grundton $ut_1 = C = c^{-1}$ und schreitet bis zum

20. harmonischen Tone fort. Der Preis dieser aus 19 Resonatoren bestehenden Reihe ist loco Paris 150 Francs. Diese Reihe, bei welcher die eingeklammerten Ziffern die fortläufenden Nummern bedeuten, steht wie folgt:

ut_2	sol_2	ut_3	mi_3	sol_3	(ais^1+)	ut_4	re_4	mi_4	(fis^2-)
c^0	g^0	c^1	e^1	g^1		c^2	d^2	e^2	
(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)

sol_4	(as^2+)	(ais^2+)	si_4	ut_5	(des^3-)	re_5	(es^3-)	mi_5
g^2			h^2	c^3		d^3		e^3
(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)

Das Zeichen + zeigt an, der entsprechende Ton sei etwas höher als der angeführte Name des Tones. Das Zeichen — sagt das Gegentheil.

4. *Tabelle für die Dimensionen der König'schen Resonatoren.* In dieser Tabelle bedeutet a das Maß der Längenaxe CD (Fig. 2) im Centimeter (cm) und Millimeter (mm) ausgedrückt; u bezieht sich auf die Breitenaxe cd; o auf den Durchmesser der kleineren Öffnung ab, O auf den grösseren Durchmesser AB und l auf die Länge der Krümmung bdB oder acA.

Dimensionen	Nr. 2 $ut_2 = c^0$ *)	Nr. 3 $sol_2 = g^0$	Nr. 4 $ut_3 = c^1$	Nr. 5 $mi_3 = e^1$	Nr. 6 $sol_3 = g^1$
a	27cm —	20cm 6mm	16cm —	12cm 7mm	11cm —
u	73cm 9mm	54cm 3mm	41cm 2·5mm	31cm 7mm	28cm 9mm
o	— 7mm	— 6·5mm	— 6mm	— 6·5mm	— 6·7mm
O	4cm 5mm	4cm —	3cm 4mm	2cm 3mm	2cm 2mm
l	36cm 4mm	27cm 4·6mm	20cm 5mm	16cm 2mm	14cm 4·5mm

Dimensionen	Nr. 7 ais^1+	Nr. 8 $ut_4 = c^2$	Nr. 9 $re_4 = d^2$	Nr. 10 $mi_4 = e^2$	Nr. 11 fis^2-
a	10cm 3mm	9cm —	8cm 7mm	7cm 6mm	7cm 5mm
u	24cm 1mm	21cm 2mm	19cm 5mm	17cm 6·5mm	17cm 5mm
o	— 6mm	— 6mm	— 6·2mm	— 5mm	— 6·25mm
O	1cm 8·5mm	1cm 7mm	1cm 5·7mm	1cm 7mm	1cm 6mm
l	12cm 8mm	11cm 2mm	10cm 5mm	9cm 2mm	9cm 1mm

*) Der Resonator Nr. 1. für den Grundton $ut_1 = C = c^{-1}$ ist der Reihe nicht beigegeben.

Dimensionen	Nr. 12 $sol_1 = g^2$	Nr. 13 $as^2 +$	Nr. 14 $ais^2 +$	Nr. 15 $si_1 = h^2$	Nr. 16*) $ut_5 = c^3$
a	7cm 1mm	6cm 6·5mm	6cm 3·5mm	6cm 1mm	5cm 8·5mm
u	17cm —	16cm 2mm	14cm 8mm	14cm 6·5mm	14cm 7·5mm
o	— 6·7mm	— 4·5mm	— 7mm	— 5·5mm	— 6·5mm
O	1cm 5mm	1cm 6mm	1cm 6mm	1cm 6·5mm	1cm 8mm
l	8cm 4mm	8cm 1·5mm	7cm 6·5mm	7cm 2·7mm	7cm 1·5mm

Dimensionen	Nr. 17 $des^3 -$	Nr. 18 $re = d^3$	Nr. 19 $es^3 -$	Nr. 20 $mi_5 = e^3$	Anmerkung.
a	5cm 7·25mm	5cm 4mm	5cm 4mm	4cm 9·5mm	Bei der 3ten Dimension bemerkt man kein stetes Abnehmen.
u	12cm 6·5mm	12cm 6mm	11cm 7mm	11cm 6mm	
o	— 5·5mm	— 6·5mm	— 6·25mm	— 6·5mm	
O	1cm 2·75mm	1cm 4mm	1cm 2·5mm	1cm 2·5mm	
l	6cm 8mm	6cm 4·5mm	6cm 2·5mm	5cm 9mm	

5. Eine kleinere Reihe Resonatoren (50 Frc. loco Paris) ist für folgende Töne gestimmt: Nr. 1 $ut_2 = c^0 = C$ als Grundton (nicht beigegeben); Nr. 2 $ut_3 = c^1$; Nr. 3 $sol_3 = g^1$; Nr. 4 $ut_4 = c^2$; Nr. 5 $mi_4 = e^2$; Nr. 6 $sol_4 = g^2$; Nr. 7 as^2+; Nr. 8 $ut_5 = c^3$; Nr. 9 $re_5 = d^3$; Nr. 10 $mi_5 = e^3$.

6. Für den Ton $la_3 = a^1$, d. i. für das Normal $= a^1$ liefert Hr. König vereinzelt einen Resonator, wie er überhaupt für jeden beliebigen Ton den geeigneten Resonator sammt entsprechender Stimmgabel anzufertigen bereit ist.

7. Je enger unter sonst gleichen Umständen die weitere Mündung O des Resonators ist, desto tiefer und kräftiger wird der Eigenton; aber desto näher muss auch letzterer dem erregenden Tone sein.

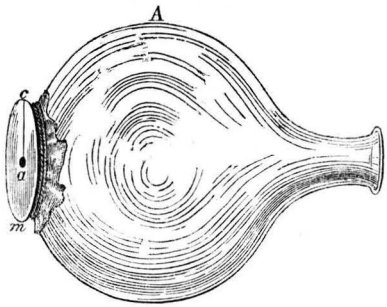
8. Die Resonatoren zeigen, dass es streng genommen, kein allgemeines Hörrohr geben könne. In ähnlicher Weise verhält es sich mit den Sprachröhren; auch bei diesen wirkt die Resonanz der eingeschlossenen Luftsäule verstärkend, und auch hier müsste genau genommen für jeden Ton ein entsprechendes Rohr gestimmt werden. Im Allgemeinen sollte das Sprachrohr der mittleren Tonhöhe des Hineinrufenden angemessen sein.

7. *Membranen als klanganalysirende Mittel.* a) Wie schon erwähnt, können auch Membranen zur Klanganalyse verwendet

*) Bei diesem Resonator erscheinen zwar einige Dimensionen größer als bei dem tiefer gestimmten Nr. 15; aber es fehlte der untere Rand B (Fig. 2), der behufs der Stimmung weggenommen wurde.

werden [9]). Der Sand auf einer über einen Rahmen gespannten Membrane geräth in Bewegung, so oft man durch Singen aus der Entfernung ihre Eigentöne erregt (vergleiche das Studium der Membranen, in akustischer Beziehung, Cap. III). Am leichtesten geschieht dies, wenn man (Fig. 5) die Membrane mit einem bestimmten, abgegrenzten Luftvolum verbindet. Zu diesem Behufe wird die weitere Öffnung eines resonatorförmigen Körpers (z. B. einer Flasche mit abgesprengtem Boden u. dgl.) mit einer Membrane überspannt. Man wendet dann die Membrane nach oben und bestreut sie mit Sand. Dieser wird in Bewegung gerathen oder sich sogar zu einer Klangfigur anordnen, so oft in einiger Entfernung von dem resonatorförmigen Körper ein Grund- oder Oberton erklingt, welcher einem der Eigentöne der Membrane gleich ist. Dies ist nur bei einer Zerlegung der Luftwellen in pendelartige Schwingungen möglich.

Fig. 5.



b) Der Grundton eines mit einer Membrane überspannten, resonatorförmigen Körpers wird tiefer, je größer die Membrane oder das Luftvolum genommen werden, je weniger man erstere spannt nnd je enger die Öffnung des resonatorförmigen Körpers ist.

c) Bei Anwendung eines genügend großen Hohlkörpers und bei guter, gleichmäßiger Spannung der Membrane spricht in der Regel der Grundton der Membrane viel leichter als ihre anderen Eigentöne an. Hat man sich überzeugt, dass immer nur der Grundton der Membrane anspricht, so kann man ihre Schwingungen durch ein sehr leicht bewegliches, die Membrane berührendes Pendelchen ersichtlich machen. Man hält dann den Apparat so, dass das Pendelchen lothrecht hängt. Eine solche Vorrichtung ist sehr bequem, weil man nicht erst

den Sand aufzustreuen, sondern den Apparat immer bereit zur Anwendung hat. Ein solcher Apparat setzt an Stelle des Ohres das Auge; aber er ist nicht so empfindlich, wie die eigentlichen Resonatoren.

Das Pendelchen besteht aus einem Coconfaden, der mit Klebwachs befestigt wird und aus einem Siegellacktröpfchen oder aus einem hohlen Hollundermarkstückchen.

8. Die Saiten als klanganalysierende Mittel. a) Auch die Saiten gerathen durch die bei der Zerlegung der Luftschwingungen erhaltenen, einfachen, d. i. pendelartigen Schwingungen in's Mitschwingen, wenn die Periode einer dieser pendelartigen Bewegungen mit der Periode eines der Eigentöne der Saiten übereinstimmt. Da sich aber gewöhnlich mehrere solche einfache Schwingungen ergeben, mit welchen die vielen Obertöne der Saiten übereinstimmen, so wird das Mitschwingen der gewöhnlichen, unbelasteten Saiten nicht so gut wie die subjectiven (§. 4 bis 6) und objectiven (§. 7) Resonatoren zum Aufsuchen der in einem Klange vorhandenen Einzel-, Theil- oder Partialtöne dienen können; wol aber werden sie dazu gebraucht werden können, die Existenz der Obertöne nachzuweisen, wie aus dem Folgenden hervorgehen wird.

b) Drückt man die Taste einer Claviersaite langsam nieder, so befreit man sie von ihrem „Dämpfer", d. i. von einem weichen Stoff (feinem Filz), welcher die Saite nicht in's Schwingen kommen lässt, wenn er sie berührt. Befreit man in solcher Weise z. B. die Saite c^{-1} von ihrem Dämpfer und schlägt die Saite c^0 an, so hört man bei der freien Saite c^{-1} den Oberton c^0 mitklingen. Es unterliegt keinem Zweifel, dass dieser Ton von der Saite c^{-1} herrührt, denn die angeschlagene Saite c^0 kann wegen des anliegenden Dämpfers nicht nachtönen. In solcher Weise lässt sich durch Anschlagen der Saiten $g\text{-}^1$, c^0, e^0, g^0, b^0, c^1, d^1, e^1, f^1 oder fis^1, g^1, as^1, ... die freie Saite $c\text{-}^1$ mit dem gleichen Oberton $g\text{-}^1$, c^0, e^0, g^0, b^0, c^1, d^1, e^1, f^1 oder fis^1 g^1, as^1 ..... durch Resonanz zum Tönen bringen.

1. Für die höheren Töne am Clavier sind stets drei gleichgestimmte Saiten („der Chor") vorhanden, welche zusammen wie eine einzige Saite wirken.

2. Die hier erwähnten Versuche habe ich nach Helmholtz an mehreren Clavieren im Salon Ehrbar (Clavier-Etablissement in Wien) mit gutem Erfolge wiederholt.

3. Der 7., 9. und 11. dieser Töne waren schwach und undeutlich; die übrigen hingegen klar und kräftig. Die über dem 12. dieser Töne hinausliegenden waren nur noch schwach bis auf den 15., der noch ziemlich stark war.

4. Auch die angeschlagenen Accorde g^{-1}, c^0 und e^0; c^0, e^0, g^0 und e^0, g^0 und c^1 brachten die freie Saite c^{-2} mit den gleichen Dreiklängen zum Nachklingen.

c) Man kann auch am Clavier die Saiten für die höheren Töne, z. B. c^0 vom Dämpfer „frei" machen und die Saiten für die tieferen Töne, z. B. c^{-1} anschlagen. Die in dem tieferen Klange enthaltenen Obertöne bringen sodann die „freie" Saite durch Resonanz zum Ertönen. Da auch hier die angeschlagene Saite sogleich durch den Dämpfer zum Schweigen gebracht wird, so kann der Ton nur von der freien Saite c^0 herrühren. Ueberdies kann man sich hievon auch noch durch die Bewegung der bekannten, auf die betreffenden Saiten aufgesetzten Papierreiterchen überzeugen. Man sieht die letzteren auf der Saite c^{-1} in Ruhe und auf jener c^0 in Vibration; natürlich muss dann der Deckel des Clavieres offen sein. Bei dem eben angeführten Verfahren konnte ich nur bis zum 3. tieferen harmonischen Tone beim Anschlagen zurückschreiten, wenn ich noch ein deutliches Resultat haben wollte.

d) Wenn man bei einem Clavier das rechte Pedal niedertritt, so befreit man alle Saiten von ihren „Dämpfern". Hat man dies gethan und ruft in's Clavier vorne auf die offen gelegten Saiten z. B. den Vocal *a* laut hinein, so hört man aus dem Claviere deutlich laut nachhallend, fast wie ein Echo den Selbstlaut *a* zurückschallen. In der Nacht angestellt ist dieser Versuch von fast wunderbarer Wirkung. In ähnlicher Weise schallen *e, i, o, u, au*... aus dem Clavier, wenn *e, i, o, u, au*... hinein gerufen oder besser gesungen werden. Die Ursache hiervon ist ebenfalls die Resonanz. Die Selbstlaute

sind nämlich (wie weiterhin bewiesen werden soll) aus vielen musikalischen Tönen zusammengesetzt, welche die gleichgestimmten Saiten, und jene Saiten, welche die gleichen Obertöne enthalten, durch Mitschwingung in's Klingen bringen [10]).

1. Diesen prachtvollen Versuch wird sich Niemand entgehen lassen, dem ein Clavier zu Gebote steht. Nach dem heutigen Stande der Akustik sollte jedes gut dotirte physikalische Cabinet wenigstens ein Pianino und eine Physharmonika besitzen.

2. Der Deckel des Claviers kann bei diesem Versuche auf- oder zugemacht werden; jedenfalls muss jedoch vorne das Clavier so weit aufgedeckt sein, dass man in das Clavier auf die Saiten rufen oder singen könne.

3. Bläst man mit einer Clarinette auf alle von den Dämpfern befreite Saiten eines Claviers, so geben die im Clavier durch Resonanz erregten Töne den Clarinettenklang wieder.

4. Beim Hineinsingen der Vocale in das Klavier dürfte nach meinen bisherigen Erfahrungen die Tonhöhe von Einfluss sein. Ebenso scheint je nach den Clavieren die Stelle, wo hineingerufen wird, für die Stärke und Deutlichkeit der Klangnachahmung von Bedeutung. So zeigte sich z. B. die Wiedergabe des i bei einigen Clavieren stärker, wenn es gegen die höher gestimmten Saiten gerufen wurde. Das *u* und *o* erklangen kräftiger wieder, wenn sie auf die mittelhohen Saiten gerufen wurden. Allgemeines lässt sich hierüber nichts sagen, weil je nach der Eigenthümlichkeit des Claviers andere Verhältnisse sind. In der Regel ertönte das *a* stark, fast geisterhaft; diesem zunächst das *e*; *o*, *u* und *i* schwächer; *ae* und *oe* ziemlich stark und *ue* schwach.

e) Die Saitentöne können auch dazu dienen, die Partialtöne in der menschlichen Stimme bemerkbar zu machen. Man lasse z. B. eine Bassstimme das reine, hochdeutsche *A* mit dem Tone *es* aushalten und schlage am Claviere schwach den Ton g^2 an. Man wird dann noch immer den letzten Clavierton zu hören glauben, wenn auch die Saite längst gedämpft, mithin zum Schweigen gebracht worden ist. Durch den Saitenton wurde also die Aufmerksamkeit des Ohres auf den ganz gleichen Partialton in der Stimme des Singenden hingeleitet und festgehalten, als der Clavierton längst verklungen war. In gleicher Weise verhält es sich, wenn bei gleichbleibender Tonhöhe der Vocal *O* gesungen und die Note b^1 am Claviere schwach angeschlagen wird. Bei Wiederholung dieser herrlichen, von Helmholtz [11]) angegebenen Versuche fand ich, dass die in sol-

cher Weise durch die Aufmerksamkeit herausgehobenen Partialtöne gegen Ende des Versuches stärker, als in der vorangehenden Zeitperiode zu klingen scheinen.

9. Rückblick. a) Aus dem bisher Vorgeführten ergibt sich: Die Obertöne sind nicht, wie man bisher glaubte, nur selten vorkommende, vereinzelte, schwache Schallerscheinungen, sondern sie sind fast in jedem Klange enthalten und machen, wenn sie in großer Anzahl vorkommen, das Wesen einer schönen Klangfarbe, indem sie scheinbar in einen Ton oder besser in einen Klang verschmelzen. Aber eben dieses Zusammenfließen in einen einzigen Klang ist die Ursache, dass sie so selten isoliert wahrzunehmen sind und dass man sie bisher für sehr schwach hielt. In der That sind aber die ersten Obertöne nur um weniges schwächer als der Grundton, wie man sich durch die angeführte Klanganalyse überzeugen kann.

Die Obertöne waren eine längst gekannte Thatsache und wurden in den Lehrbüchern der Physik bei den Saiten, an welchen sie am leichtesten isoliert hervorzurufen sind, unter dem Namen der „harmonischen Töne" oder der „Flageolet- oder Vogeltöne" behandelt. Die schönen Töne der „Windharfe" (Äolsharfe) [12]) sind nichts anderes, als solche zu einem Klange verschmolzene Obertöne. Und ähnlich verhält es sich überhaupt mit jedem Klange, gleichviel, ob er einem einzigen oder mehreren, übereinstimmenden Schallinstrumenten entspringt. Es kommt nur darauf an, die Partialtöne auszusondern.

b) Dazu dienen, wie schon erwähnt, am besten die Resonatoren. Hat man mittelst eines Resonators in einem Instrumental- oder Vocalklang irgend einen Partialton isoliert, so hört man ihn auch noch, nachdem der Resonator langsam vom Ohre entfernt worden ist. Hieraus und aus den vorigen Versuchen (§. 8) ist klar, dass auch das unbewaffnete Ohr die Obertöne auszuscheiden vermag, vorausgesetzt, dass seine Aufmerksamkeit darauf gelenkt wird. Wer sehr oft derartige Versuche macht, kann es endlich dahin bringen, ohneweiters die ersten Obertöne herauszuhören. Ja es können manche Personen von Natur

aus selbst im gesungenen Klange einige Partialtöne vernehmen (vergl. §. 3).

10. Theorie über die Vocale und Consonanten. a) Der Klang der menschlichen Stimme wird im wesentlichen durch eine Pfeife mit einer membranösen Zunge und einem veränderlichen Ansatzrohr hervorgebracht. Die Membranen-Zunge ist durch die „Stimmbänder" im Kehlkopfe und das variable Ansatzrohr durch die „Mundhöhle" gegeben. Und wie „die Klänge der Zungenpfeifen" sich mit der Art der Zungen und der Ansatzröhren ändern [13]), so verhält es sich auch mit dem Klangwechsel der menschlichen Stimme. Die Zungenpfeifen ohne Ansatzrohr lassen Obertöne bis zur Ordnungszahl 16 oder 20 deutlich hören mit scharfer, schnarrender Klangfarbe. Das Ansatzrohr kräftigt durch Resonanz einige Partialtöne bis zu einer bestimmten Höhe und zwar bei der Clarinette mit nahezu cylindrischem Ansatze die ungeradzahligen Obertöne bis zur Zahl 7, bei der Oboe, dem Fagott, der Trompete, den Hörnern, kurz bei den Instrumenten mit trichterförmigem Ansatze sämmtliche harmonischen (die gerad- und ungeradzahligen) Obertöne bis zu einer bestimmten, von den speciellen Umständen abhängigen Grenze.

Bei der Trompete und dem Horne ersetzen bekanntlich die vibrierenden Lippen die schwingende Pfeifenzunge.

b) Bei den gewöhnlichen Zungenpfeifen verstärkt die Resonanz im Ansatzrohre den Grundton und einige Obertöne des von den schwingenden Zungen erregten Klanges. Wird jedoch einer der Obertöne mittelst Resonanzröhren besonders verstärkt, so dass die Kräftigkeit des Grundtones und der anderen Obertöne dagegen zurückstehen, so nähert sich die Klangfarbe den „Vocallauten" der menschlichen Stimme. Und darauf beruht im wesentlichen die Erzeugung des Klanges der menschlichen Stimme [14]). Die Spannung, also die Elasticität der Stimmbänder und die Stärke des Anblasens bedingen die Höhe des Gesammtklanges, welche auch noch von der veränderlichen Dicke der Stimmbänder abhängig zu sein

scheint. Die Luft in der Mundhöhle vermag die Höhe des Grundtones der schwingenden Stimmbänder nicht wahrnehmbar abzuändern. Die Wandungen dieses veränderlichen Ansatzrohres geben nämlich den durch das Mitschwingen erregten, von ihnen begrenzten Luftschwingungen eher nach, als die stark gespannten, schwingenden Membranen. Die letzteren erhalten also der Hauptsache nach jene Geschwindigkeit der Schwingungen (Tonhöhe), welche ihre Elasticität erfordert. Hingegen werden die Eigentöne (der Grundton und die Obertöne) der von der Mundhöhle eingeschlossenen Luft erklingen, wenn einer der Partialtöne des von den Stimmbändern herrührenden Klanges ihnen so nahe liegt, um sie durch Resonanz zum Mitschwingen anzuregen. Da man aber die Mundhöhle verschieden formen, also verschieden stimmen kann, so lässt sich in solcher Weise durch Resonanz die Klangfarbe der menschlichen Stimme mannigfach abändern.

In solcher Weise lässt sich diese Klangfarbe sogar in die Vocale umgestalten, welche mit den in der Mundhöhle erzeugten „Geräuschen" und nicht musikalischen Schallerscheinungen die Consonanten geben.

1. Die ältere (1794) Sprechmaschine von Kempeln[15]) und eine neuere von Faber[16]) aus Wien beruhen im wesentlichen auf Zungenpfeifen mit Verstärkung durch Resonanz.

2. Da bei den Consonanten unmusikalische Töne oder Geräusche störend mitwirken, so ist klar, warum mit einer consonantenarmen Sprache (z. B. bei der italienischen) der Gesang reiner bleibt und schöner klingt als mit einer von Consonanten strotzenden Sprache.

c) Jeder Vocal fordert einen gewissen Eigenton der Mundhöhle behufs der Resonanz der von letzterer eingeschlossenen Luft. In der That gestaltet sich die Mundhöhle für jeden Vocal anders und hat dann verschiedene Eigentöne. Der Eigenton der Mundhöhle kann mittelst angeschlagener Stimmgabeln, welche vor die Mundöffnung gebracht werden, aufgefunden werden. Der Ton jener Stimmgabel, welcher bei diesen Versuchen am meisten verstärkt wird, ist zugleich der Eigenton der Mundhöhle. Helmholtz hat in solcher Weise herausgebracht:

1) Die Gestalt der Mundhöhle und in Folge dessen ihr Eigenton ändern sich selbst bei den feineren Schattirungen eines und desselben Vocals bedeutend.

2) Die Grösse oder Kleinheit der Mundhöhle ist von geringem Einfluss auf die Höhe ihres Eigentones, wenn ihre vordere Öffnung in einem entsprechenden Verhältnisse kleiner oder größer wird. Die Größe der Mundöffnung dient also für den nämlichen Eigenton als Ausgleicher für das Volumen der Mundhöhle.

Die kleinere Mundhöhle der Frauen und Kinder hat für den nämlichen Vocal nahezu dieselbe Stimmung, gibt also die gleiche Resonanz mit jener Stimmgabel, welche die Luft in einer großen Mundhöhle zum stärksten Mitschwingen bringt. Eigentlich hätten aber die kleineren Mundhöhlen durch höher gestimmte Gabeln zur Resonanz gebracht werden sollen. Die kleinere Mundöffnung compensiert also den Einfluss des größeren Luftvolumens (§. 6 Note 7).

3) Für den Vocal *u* hat die Mundhöhle den Eigenton *f*
„ „ „ *o* „ „ „ „ „ *b*^{1}
„ „ „ *a* (norddeutsche Aussprache) „ *b*^{2}

Den übrigen Vocalen und Umlauten entsprechen je zwei Eigentöne, ein höherer und tieferer. Bei diesen Lauten hat nämlich die Mundhöhle die Form einer Flasche mit langem, engem Halse. Der Luft im letzteren entsprechen dann die höheren Eigentöne. Bei den Vocalen *u* und *o* ist der Hals der runden Flaschenform des Mundes so kurz, dass ihm kein Eigenton zukömmt, und in gleicher Weise verhält es sich bei der Trichterform des Luftvolumens im Munde beim Vocal *a*.

Donders[17]) hat die verschiedene Stimmung der Mundhöhle je nach den Vocalen mittelst des Geräusches der Luft, welches beim Flüstern der Vocale entsteht, bestimmt; dabei aber von den Helmholtz'schen Angaben etwas abweichende Resultate bekommen [18]).

d) Analysiert man die Vocale mittelst der Resonatoren (§. 5), so ertönen gerade jene Töne am stärksten, für welche die Mundhöhle bei dem zu untersuchenden Vocal abgestimmt ist (vergl. *c* dieses §. Nr. 3). Bei einer solchen Analyse lässt man die Vocale mit einem bestimmten Tone singen. Unter gleichzeitiger Anwendung einer Reihe von Resonatoren findet man dann bald die Obertöne des zu prüfenden Vocales. Die

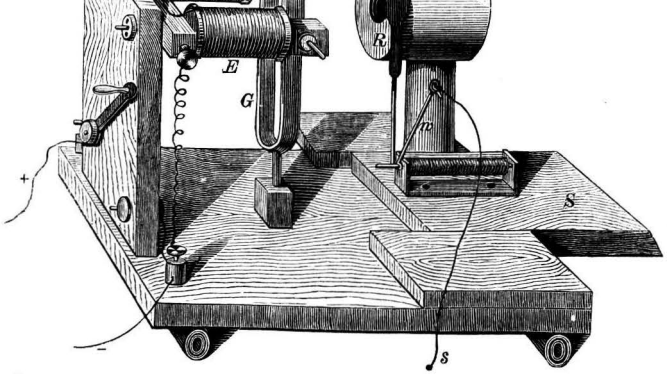
Vocale sprechen aber für verschiedene Tonhöhen ungleich gut an. Bei einer passenden Note werden die Obertöne besonders verstärkt.

e) Bei der mit Hilfe der Resonatoren ausgeführten Analyse der gesungenen Vocale zeigt sich, dass die Stärke ihrer Obertöne, nicht wie bei den Klängen der meisten musikalischen Instrumente, von der Ordnungszahl der letzteren, sondern von ihrer absoluten Tonhöhe abhängt.

Der Vocal *a* mit der Höhe $es-^1$ gesungen lässt den zwölften Partialton am stärksten hören; legt man aber dem Vocal *a* beim Singen den Ton b^1 unter, so wird der zweite Theilton verstärkt.

11. Princip des „Vocal-Apparates" nach Helmholtz. Mittelst der Resonatoren ist es möglich, gegebene Klänge, z. B. die Vocalklänge, zu analysieren, d. i. die Anzahl und Stärke ihrer Partialtöne (der Grundtöne und ihrer Obertöne) aufzusuchen. Helmholtz war aber auch darauf bedacht, mittelst eines von ihm erfundenen Apparates Klänge und besonders die Vocalklänge aus reinen, einfachen Tönen zusammenzusetzen [19]). Reine und einfache musikalische Töne erhält man

Fig. 5.

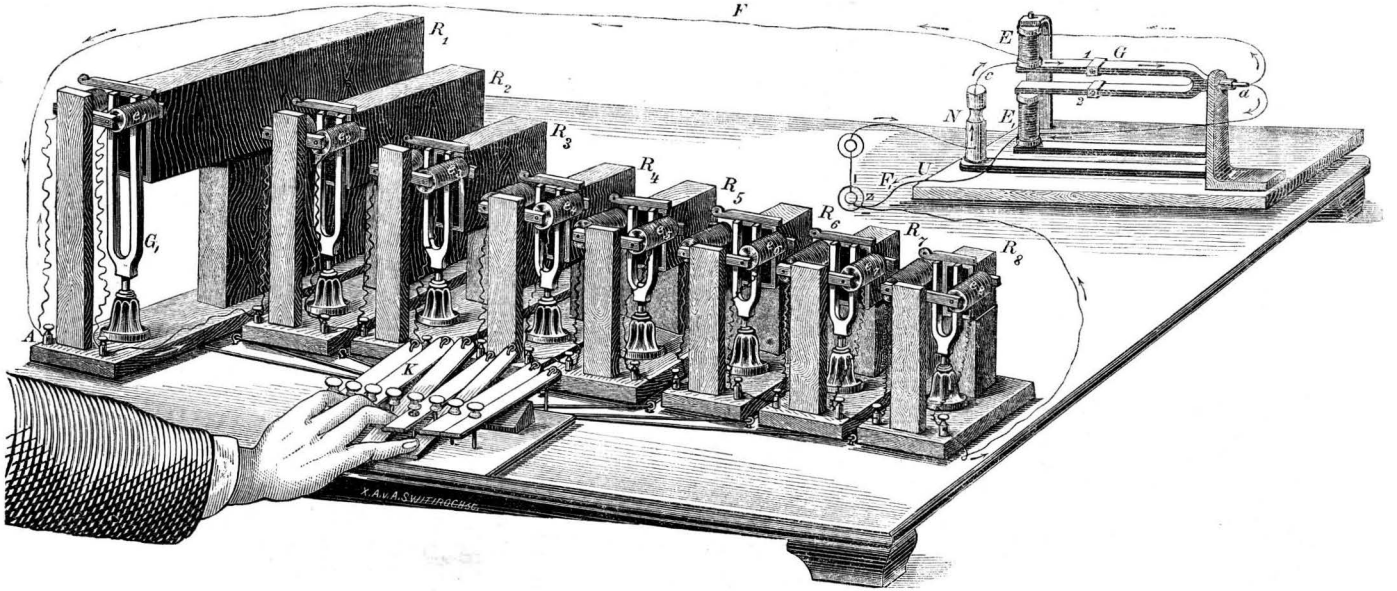


mittelst Stimmgabeln (Fig. 5 u. 6), welche vor einer Resonanzröhre *R* zum Schwingen gebracht werden — vorausgesetzt, dass der Grundton der Röhre der nämliche ist, wie jener der Gabel (§. 2, Note 3). Je nach der Verschiedenheit bezüglich

der Tonhöhe und Stärke der gleichzeitig erklingenden einfachen Töne kann man dann verschiedene Klangfarben und auch die im wesentlichen aus musikalischen Tönen bestehenden Vocalklänge künstlich zusammensetzen. Die Stärke der einfachen Stimmgabeltöne wird erhöht oder erniedrigt, je nachdem man die vor jeder Gabel befindliche Röhrenöffnung mit einem Schieber durch einen damit verbundenen Taster weniger oder mehr schließt. Beim gänzlichen Verschlusse einer Resonanzröhre ist der Ton der zugehörigen Gabel kaum vernehmlich und also beim zu erzeugenden, zusammenzusetzenden Ton oder „Klang“ nicht mitwirkend.

Da es bei diesen Studien darauf ankömmt, mehrere Stimmgabeln gleichzeitig zur Bewegung anzuregen und ihre Schwingungen längere Zeit in ungeänderter Stärke zu erhalten, so verwendete Helmholtz zu diesem Zwecke Elektromagnete. Jede Stimmgabel hat nämlich (Fig. 5 und 6) ihre Zinken in gleicher Entfernung von den Polen eines hufeisenförmigen, weichen Eisenkernes, der in einer für galvanische Ströme bestimmten Drahtspuhle steckt. Sobald diese Drahtgewinde von einem nur einen Augenblick dauernden galvanischen Strom umflossen werden, verwandelt sich der weiche Eisenkern in einen Magnet und zieht die Zinken in auseinander gehender Richtung an. Und weil der elektrische Strom nur momentan (unendlich kurz) dauert, so kehren die Gabelenden vermöge ihrer Elasticität in ihre Ruhelage zurück und gehen sogar vermöge der Trägheit mit der erworbenen Geschwindigkeit über die Ruhelage so weit hinaus, als sie vorhin nach der entgegenliegenden Seite davon abgewichen waren — kurz, sie gerathen ähnlich einem Pendel in Schwingungen. Der Unterschied von der Pendelbewegung liegt hier nur in der anregenden Kraft. Letztere rührt beim Pendel von der Schwere her, bei den Gabeln jedoch von der Elasticität. Nun würden aber die Ausschlagwinkel der Zinken oder ihre Schwingungsbögen durch den Luftwiderstand immer kleiner werden, wenn man die bewegende Kraft nicht immer von neuem einwirken ließe. Es wird daher am besten sein, die volta'schen Ströme in jedem

Fig. 6.



Augenblicke immer wieder mittelst der Elektromagnete auf die Gabeln in der besprochenen Weise wirken zu lassen, d. h. es wird gerathen sein, zweckmäßig unterbrochene, galvanische Ströme durch die Gewinde der hufeisenförmigen Eisenkerne zu senden. Da diese elektrischen Ströme regelmäßig und in einem bestimmten Verhältnisse zur Tonhöhe (zur Schwingungszahl der Gabeln, bezogen auf die Secunde) unterbrochen werden müssen, so hat Helmholtz hiezu das Princip der „Selbstunterbrechung" beim Neef'schen Hammer[20]) in folgender Weise angewendet:

Der elektrische Strom geht (Fig. 6) vom positiven Pole in der Richtung der Pfeile um sämmtliche weiche Eisenkerne und kehrt bei *z* zum negativen Pole der Batterie zurück. Dadurch werden sämmtliche Elektromagnete thätig und ziehen die Gabelarme an. Was nun die Selbstunterbrechung betrifft, so fassen wir die Gabel *G* besonders in's Auge.

Der volta'sche Strom fließt durch das Metallsäulchen *N* und das darin befindliche Quecksilber auf den Platindraht *c*, dann längs der Zinke 1 zum Stiele *a* der Gabel. Von hier aus lauft der Strom um die Elektromagnete *E* und E_1 und dann über *F* um sämmtliche Elektromagnete und bei F_1 auf kurzem Wege bei *z* zurück zur Batterie. Die Elektromagnete *E* und E_1 ziehen in Folge dessen die Äste der Gabel *G* magnetisch an. Dabei wird aber der Draht *c* aus dem Quecksilber gehoben. Der galvanische Strom ist dadurch unterbrochen, die Elektromagnete *E* und E_1 hören auf anziehend zu wirken, die Gabelzweige beginnen vermöge ihrer Elasticität ihre erste Schwingung. Hiebei geräth aber der Draht *c* wieder in das Quecksilber, die Elektromagnete werden wieder wirksam, die Gabelenden also angezogen und der Strom unterbrochen — und so wiederholt sich das Spiel, deren Folge die regelmäßige, zur Tonhöhe der übrigen Gabeln berechnete Selbstunterbrechung des galvanischen Stromes ist.

12. Näheres über den Helmholtz'schen Vocal-Apparat. *a)* Die Stimmgabeln waren so gewählt worden, dass sie, angeschlagen und frei in der Luft gehalten, kaum hörbar waren.

Damit dies auch bei geschlossener Resonanzröhre *R* (Fig. 5) der Fall sei, müssen die Stimmgabel und das Fußbret des ganzen Apparates auf einem Schallisolator (einem weichen, nicht tönbaren Körper, z. B. Tuch, Papierlappen, Kautschukschläuchen) ruhen. Dadurch wird das Mittönen der harten Unterlagen, also die störende Verstärkung des Stimmgabeltones verhütet.

Da die Gabeln aus Stahl verfertigt sind, so werden sie alle (jene des Unterbrechers *UU* in Fig. 6 miteinbegriffen) behufs der Anziehung von den Elektromagneten vorher für immer magnetisch gemacht. Der galvanische Strom wird dann so durch die Elektromagnete gesendet, dass je ein Pol des Elektromagnetes mit der benachbarten Gabelzinke ungleichnamig magnetisch ist, also Anziehung erfolgen muss.

b) Bei der Unterbrechungs-Vorrichtung *UU* (Fig. 6) wurde statt einer einfachen Feder eine Stimmgabel verwendet, weil die Wurzel der letzteren nur sehr schwach in Bewegung geräth, also das Ausschalten der Resonanztöne des Gestelles leichter wird, besonders wenn man noch einen Schallisolator (eine Tuch-, Leder- Kautschukscheibe etc.) zwischen den Stiel und seinen hölzernen Träger bringt. Überdies lassen sich die Schwingungen der Stimmgabeln leichter regeln. Und dies ist nothwendig! Es lässt sich die Gabel des Unterbrechers *UU* leicht durch Anwendung einer passenden Schiebervorrichtung 1 u. 2 (Fig. 6) höher oder tiefer stimmen, je nachdem man den Schieber mehr gegen Stiel oder mehr gegen das freie Ende des Armes rückt und feststellt [21]).

Die Stimmgabel des Unterbrechers hat in der Regel dieselbe Tonhöhe wie die tiefste G_1 der übrigen Stimmgabeln. Die Arme der Gabel G_1 werden also bei je einer Schwingung der den galvanischen Strom unterbrechenden Gabelzinke einmal, und zwar nur für einen Augenblick von dem entsprechenden Elektromagnet, angezogen.

An den Stimmgabeln, welchen ein 2, 3, 4 . . . *n* mal höherer Ton als der Unterbrechungsgabel zukömmt, erfolgt von den zugehörigen Elektromagneten eine kurz dauernde Anzie-

hung ihrer Zinken beziehungsweise nach je 2, 3, 4...n Schwingungen dieser Gabelarme.

Um das Zusammenfallen der Anziehungen an den für die Zusammensetzung der Klänge bestimmten Gabeln und der unterbrechenden Gabel zu bewirken, werden die ersteren mit jener vom tiefsten Tone beginnend nach und nach in den galvanischen Strom eingeschaltet und jede so abgestimmt, dass sie bei offener Resonanzröhre den unter vorliegenden Umständen möglichst stärksten Ton gibt. Das Tieferstimmen einer Gabel geschieht dadurch, dass man die Masse der freien Zinkenenden im Vergleiche mit den dem Bogen naheliegenden Enden vermehrt; für das Höherstimmen gilt die entgegengesetzte Regel. Durch das Dünnerfeilen der Zinkenwurzeln, durch das Ankleben von Wachs auf die freien Enden der Gabelarme, durch das Verrücken eines Schiebers gegen das freie Ende der Zinken wird also der Ton der Gabeln tiefer gemacht, durch das umgekehrte Verfahren erhöht[22]). Die durch Änderungen im Wärmezustand der Gabeln bewirkten kleinen Tonvariationen können also am besten durch Ankleben von Wachs an den freien oder Wurzelenden der Gabelzinken ausgeglichen werden.

c) Den Verschluss der Resonanzröhren R (Fig. 5) bewirkt ein Deckel, welcher durch den von einer Spiralfeder (unterhalb w, Fig. 5) herrührenden Druck vor die Mündung der Röhre geschoben wird. Beim stärkeren oder schwächeren Anziehen mittelst des Schnürchens s wird dieser Federkraft mehr oder weniger entgegengearbeitet, mithin die Mündung in höherem oder niedrigerem Maße geöffnet. Alle Schnüre s enden in einer Tastenvorrichtung (Fig. 6) und werden von hier aus in bequemer Weise gehandhabt. Eine weitere Verstärkung und Schwächung des von der offenen Röhre herrührenden Resonanztones wird durch Näherschieben oder Entfernen der Röhre R bezüglich ihrer Stimmgabel bewirkt. Die zu diesem Behufe besorgte Schlittenvorrichtung S ist aus Fig. 5 leicht zu ersehen.

Das Höherstimmen der Resonanzröhren geschieht durch Verkleinerung ihres Luftvolumens, etwa durch Eingießen von Wachs, Pech u. dgl. m. Das Vertiefen ihres Tones bewirkt man durch Verkleinern ihrer Mündung (§. 6, Note 7). Wenn die Röhren angeblasen werden, müssen sie denselben Grundton geben wie die zu ihnen gehörige Gabel.

d) Um einzelne Elektromagnete und also auch das Schwingen der entsprechenden Gabeln schnell ausschalten zu können, legt man (Fig. 5) die hinter dem Zeichen + befindliche Messingkurbel auf den unteren, nahe befindlichen Messingzapfen.

Da je eines der genannten Messingstücke mit dem entgegengesetzten Poldrahte verbunden ist, so geht nun der galvanische Strom auf diesem kürzeren Wege zum nächsten Elektromagnete, während der Elektromagnet EE nahezu unthätig bleibt.

1. Die Batterie braucht nicht gar stark zu sein; Helmholtz hat zwei bis drei Platin-Zinkelemente mit Erfolg angewendet.

2. Wegen des mächtigen „Extrastromes“[23]) tritt der Unterbrechungsfunke mit störendem Geräusche auf. Der Funke selbst und der ihn begleitende Lärm werden wie beim Ruhmkorff'schen Funkenindictor[24]) durch eingeschaltete Condensatoren und lange, mächtige Drahtwiderstände vermindert.

3. Um das zu schnelle Verbrennen des Quecksilbers an der Unterbrechungsstelle N (Fig. 6) zu verhüten, ist dasselbe (wie beim Ruhmkorff'schen Inductions-Apparat) mit einer Schichte möglichst wasserfreien Alkohols oder Terpentins bedeckt. Beide isolieren und halten dabei den Luftzutritt nach Möglichkeit ab.

4. Der Draht c ist aus Platin, weil er nicht so leicht wie ein anderer oxydiert und verbrennt. Das Säulchen N war aus Messing. Will man, dass der mit dem Quecksilber in Berührung stehende Theil des Säulchens nicht von demselben angegriffen werde, so belegt man den hohlen, oberen Theil mit Eisenblech.

5. Der erste Vocal-Apparat für Prof. Helmholtz wurde vom Mechaniker Fessel in Cöln ausgeführt. Von diesem Instrumente wurde eine Gabel sammt Resonanzröhre in Fig. 5 abgebildet. Der in Fig. 6 dargestellte Vocal-Apparat ist vom Herrn Akustiker König in Paris angefertigt und eine Photographie davon in der Londoner Industrie-Ausstellung (1862) vorgelegt worden. Bei einem neueren Vocal-Apparat hat Herr König statt der Resonanzröhren wohl abgestimmte Resonatoren (Fig. 2, pag. 6) angewendet.

13. Versuche von Helmholtz mit dem Vocal-Apparat. *a*) Helmholtz arbeitete zuerst mit acht Stimmgabeln, welche den Grundton b^{-1} (aus jener Tonhöhe, mit der Basstimmen sprechen) sammt seinen harmonischen Obertönen bis b^2 umfassten, mithin waren seine Gabeln gestimmt für:

b^{-1} (120 Hin- und Rückgänge), b^0, f^1, b^1, d^2, f^2, as^2 und b^2. Die unterbrechende Gabel (G in Fig. 6) war also auch von dem Tone b^{-1} (§. 12, *b*).

b) Die Vocale der menschlichen Stimme besitzen die auffallendsten Unterschiede in der Klangfarbe; sie enthalten verhältnismäßig niedrige Obertöne und wenig Geräusch. Sie eignen sich daher vor allen anderen Naturlauten am besten

zur Nachahmung mittelst des Helmholtz'schen Klang-Apparates, der eben wegen dieser hervorstechenden Eigenschaft von seinem Erfinder „Vocal-Apparat" genannt wurde.

c) Helmholtz suchte in der That zuerst die Vocalklänge aus jenen Partialtönen zusammenzusetzen, aus welchen sie sich bestehend zeigen, wenn man sie mit Hilfe der Resonatoren zerlegt (§. 10). Die künstlich hervorgebrachten Klänge verglich er mit den durch seine Stimme erzeugten. Das Resultat war im Ganzen und Großen ein günstiges. Die mittelst des Apparates hervorgerufenen Vocaltöne waren jedoch im Allgemeinen den gesungenen Vocalen ähnlicher als den gesprochenen und beiläufig von jenem Klange wie die, welche aus einem Claviere heraustönen, wenn man einen Vocal hineinsingt (§. 8, *d*). Dies kommt daher, weil am Stimmgabel-Apparate wie beim Singen der Grundton über die Nebentöne und die etwaigen Geräusche herrscht, während es beim Sprechen umgekehrt ist. Am leichtesten entstanden *U*, *O* und *Oe*; weniger scharf *A*, der noch die Obertöne c^3 und d^3 hat, für welche die Stimmgabeln fehlten. Für *E* und *I* reichte die Anzahl der vorhandenen Stimmgabeln vollends nicht mehr aus, indem diese Vocaltöne noch einige über b^2 hinaus gehende Obertöne besitzen. Allein als Helmholtz auch die Stimmgabeln und zugehörigen Resonanzröhren noch nachschaffte und zwar für die Töne: d^3, f^3, as^3 und b^3 und b als Grundton annahm, kam zwar das *A* recht gut, aber der Laut *E* noch immer nicht so deutlich wie die vorhin genannten Vocale und das *I* nicht befriedigend.

Die Ursache hievon liegt theils in der schwachen Bewegung der hochgestimmten Gabeln, also in der geringen Kräftigkeit der hohen Gabeltöne, theils scheint es, als ob noch einige höhere Obertöne fehlten.

1. Ein dumpfes *U* trat schon beim alleinigen Tönen der Gabel vom Tone b^{-1} oder b^0 hervor, wenn aber neben b^{-1} noch b^0 und f^1 schwach mittönten, wurde das *U* heller und deutlicher.

2. Der gedämpfte Grundton b^{-1} mit einem starken b^1 und schwächeren b^0, f^1 und d^2 lieferte ein klares *O*. — Der mäßig starke Grundton b^0 mit dem kräftigen b^1 und schwachem f^2 ließen zusammen ein *O* vernehmen.

Da in beiden Fällen das b^1 kräftig ist, so ist dies der charakteristische Ton des Vocalklanges *O*.

3. *A* besteht aus den charakteristischen, d. h. starken Tönen b^2 und d^2, ferner aus den mäßig starken b^0, b^1 und f^2.

4. *Ae* besteht aus den bezeichnenden, d. h. starken Tönen d^3 und f^3, und aus b^1, b^2 und f^2, welche schwächer als bei *A* zu halten sind.

5. *E* ist aus den charakteristischen (starken) Tönen f^3, as^3 und b^3 und aus den gemäßigten Tönen b und b^1 zusammenzusetzen.

d) Außer den Vocallauten lassen sich auch Register wie bei der Orgel erzeugen, so weit die zu Gebote stehenden Obertöne ausreichen. Das von der Brechung des Luftstromes an der Lippe der Pfeifen stammende Brausen fehlt selbstverständlich diesen Registerklängen.

Der Chor sämmtlicher Gabeln gibt die sanfteren Horntöne nahezu wieder, während man mittelst einer gewissen Anzahl ungerader Obertöne den näselnden Clarinettenklang nachzuahmen vermag.

14. Der Phasenunterschied der Theiltöne und die Klangfarbe. a) Mit Hilfe der Resonatoren und der anderen bisher bekannten klanganalysierenden Mittel lassen sich wol die Partialtöne eines Klanges ihrer Menge und Stärke nach aufsuchen, ob aber auch die Phasen-Differenz der den Klang constituierenden Einzeltöne von Einfluss auf die Klangfarbe sei, lässt sich auf diese Weise nicht herausbringen, weil hier der Stand der Phasen nicht ersichtlich gemacht wird. Anders verhält es sich bei der Synthese des Klanges mittelst des Stimmgabel-Apparates von Helmholtz. Dieser bietet (wie sich bald zeigen wird) mannigfache Methoden für bestimmte Abänderungen der Phasen in den Einzeltönen des Klanges. Bewirkt man nun diesen Phasenunterschied bei den Partialtönen, d. h. verändert man die Stellung der einzelnen pendelartigen Schwingungen oder der entsprechenden Wellen der Luft gegen einander, so zeigen sich die entstehenden Vocallaute und überhaupt die „musikalischen“ Klänge nicht verändert. Die Phasen-Differenz bleibt also bei der Unterscheidung der musikalischen Klangfarbe ohne Einfluss.

b) Die Phasenänderung der Einzeltöne, welche den Klang bilden sollen, kann am Helmholtz'schen Stimmgabel-Apparate auf dreierlei Weise bewirkt werden:

α) Am einfachsten, wenn man die Resonanzröhren durch Verkleinerung ihrer Mündung mit Hilfe der Schieber etwas tiefer stimmt und zugleich dadurch die Resonanz schwächt und die Phase ändert. Eine geringe Veränderung an dem genauen Einklange zwischen dem Grundton der Gabel und jenem der Resonanzröhre bewirkt zwar anfangs nur eine kleine Schwächung der Resonanzstärke, aber eine bedeutende Änderung der Phasen. Bei weiterer Steigerung der Verstimmung zwischen der Gabel und Resonanzröhre wächst jedoch der Phasenunterschied in einem stets minderen Maße als die Schwächung der Resonanz. Der Phasenunterschied kann durch allmähliche Verkleinerung der Mündung der Resonanzröhren bis auf ein Viertel einer Wellenlänge gebracht werden [25]).

Lässt man die Mündung der Resonanzröhre ganz offen und schwächt den Ton durch Zurückschieben der Röhre, so tritt keine Phasenänderung ein.

Helmholtz bewirkte bei der künstlichen Hervorbringung der Vocale die ganz gleiche Schwächung der betreffenden Töne bald auf die erste, bald auf die zweite Art, und fand keinen Unterschied in der Klangfarbe.

β) Kehrt man in den Spulen eines Elektromagnetes (Fig. 5) die Richtung des galvanischen Stromes um, so wechseln auch die Pole dieses Elektromagnetes. Und da die Pole der constant magnetischen Stimmgabel die nämlichen geblieben sind, so erfolgt jetzt Abstoßung beider Stimmgabelzinken, während gleichzeitig von den Elektromagneten, in deren Gewinde der galvanische Strom nicht geändert wurde, Anziehung auf die Arme ihrer Gabeln erfolgt.

Die Phase der Vibration der abgestoßenen Gabel ist also im Vergleich mit den Schwingungen der angezogenen Gabeln um eine halbe Wellenlänge verschieden.

Als nun Helmholtz in solcher Weise die Phasen-Differenz der entsprechenden Theiltöne bis zu einer halben Undulation steigerte und die Schwächung der entsprechenden Töne durch Zurückschieben der gänzlich offenen Resonanzröhren bewirkte, war noch immer kein Unterschied in der Klangfarbe der künstlichen Vocallaute wahrnehmbar, verglichen mit jenen Fällen, für welche kein Phasenunterschied hervorgerufen worden war.

1. Die Umkehrung des galvanischen Stromes an einem Gewinde geschieht am einfachsten durch Kreuzung der betreffenden Schließungsenden.

2. Bei der Abstoßung wird der Magnetismus der Gabeln geschwächt. Nach öfteren und länger dauernden derartigen Arbeiten müssen also die Stimmgabeln durch Streichen mit einem Magnete wieder magnetisch gekräftigt werden.

γ) Auch durch Ankleben von Wachsstückchen auf die Zinken der Stimmgabeln lassen sich diese verstimmen (§. 12, *b*, Anmerk.). Der Phasenunterschied wird hiebei desto größer, je bedeutender man die Verstimmung gemacht hat. Wie directe Beobachtungen nach der Methode von Lisajous*) lehren, lässt sich jedoch hier die Differenz der Phasen nicht über ein Viertel der Schwingungsdauer steigern, indem die Tonhöhe der Gabel, d. i. die Anzahl ihrer Schwingungen für die Secunde, durch die Zahl elektrischer Unterbrechungen bestimmt ist.

Die Versuche wurden wie bei der vorigen d. i. mittelst Umkehrung der galvanischen Ströme bewirkten Verstimmung von Helmholtz wiederholt und gaben dasselbe Resultat.

c) Die „musikalischen" Klangfarben unterscheiden sich also nur durch die Anzahl, Stärke und Verschiedenheit ihrer Theiltöne, nicht aber durch die Phasen-Differenz der letzteren. Dagegen lässt sich einwenden, dass die Schwebungen**) zweier bis

*) Siehe hierüber Cap. IV. „Anwendung der Optik in der Akustik" in diesem Buche. Nach dieser optischen Methode untersucht zeigt sich eine allmähliche Verschiebung der Phasen, jemehr man die Verstimmung steigert — ihre Grenze ist jedoch das Viertel einer Undulation.

**) Über „Schwebungen" siehe Cap. II dieses Buches, die ersten Paragraphe.

auf eine kleine Verstimmung harmonierender Stimmgabeln nicht nur die Tonstärke, sondern auch die Klangfarbe etwas verändern, und dass diese Schwebungen von den Phasenunterschieden der Vibrationen der Gabeln abhängen. Helmholtz hat jedoch gezeigt, dass auch in diesem Falle die geringe Änderung der Klangfarbe nur in der Veränderung der Stärke eines der Töne seine Ursache habe.

d) Die Unabhängigkeit der Klangfarbe von den Phasenzuständen der Einzeltöne gilt jedoch nur von „musikalischen" Klängen. Die nicht musikalischen Geräusche beruhen entweder gar nicht auf regelmäßigen Schwingungen oder sie bestehen aus sehr hohen, sehr nahe benachbarten Obertönen. Da Helmholtz keine sehr hoch gestimmten Gabeln zu Gebote hatte, ihre Bewegung auch zu schwach geworden wäre, so konnte der Versuch nicht gemacht werden, ob bei solchen dissonirenden Tönen die Phasen-Differenzen von Einfluss seien. Theoretische Gründe sprechen nach Helmholtz allerdings dafür.

15. Das Ohr und die Klangfarbe[26]). *a*) Die Unterschiede der Phasen sind von mächtigem Einflusse auf die Form der Wellenbewegung. Wenn nun die Versuche von Helmholtz gezeigt haben, dass Partialtöne mit und ohne Phasen-Differenz zusammen die nämliche „musikalische" Klangfarbe geben, so heißt dies mit anderen Worten: Wellen von sehr abweichenden Formen können im Ohr dieselbe „musikalische" Klangfarbe erzeugen. Das Ohr ist folglich nicht im Stande alle Wellenformen zu erkennen. Es vermag jedoch die Wellenformen bei hinreichender Aufmerksamkeit in einfache Pendelschwingungen aufzulösen, d. h. es vermag die einfachen Töne einer Klangfarbe einzeln zu empfinden. Daraus schließt Helmholtz: Jede einzelne Faser des Gehörnerven ist für die Empfindung einer besonderen Tonhöhe bestimmt. Diese Fasern enden (nach neueren Forschungen) entweder in der Schnecke als eigenthümliche, mikroskopische Gebilde, welche nach ihrem Entdecker das „Corti'sche" Organ (die Corti'schen Fasern) heißen, oder sie verlaufen in die Fasern der Ampullen

und des Vorhofes. Die Corti'schen Fasern vermitteln wahrscheinlich, nach einer Hypothese von Helmholtz, die Wahrnehmung der musikalischen Klänge in folgender Weise: Gelangen die einfachen, pendelartigen Schwingungen eines einfachen Tones bis zu dem Corti'schen Organ in der Ohrschnecke, so geräth (ähnlich wie bei der Resonanz tönender Körper) nur diejenige Corti'sche Faser in Vibration, welche mit ihm gänzlich oder nahezu gleichgestimmt ist. Ein zweiter, dritter.... einfacher Ton von einer anderen Höhe erregt wieder eine andere ihm gleichgestimmte Corti'sche und davon weitergehende Faser des Gehörnerven.

Bei zusammenwirkenden harmonischen Tönen oder „musikalischen" Klängen gerathen alle jene Corti'schen Fasern in's Mitschwingen, deren Eigentöne mit den Partialtönen des Klanges nahezu dieselbe Stimmung haben. Bei angestrengter Aufmerksamkeit und anhaltender Übung kann es glücken, diese Einzelempfindungen der Partialtöne auszusondern. Gewöhnlich fließen aber diese Empfindungen in eine einzige zusammen, und hiernach erkennen wir die mit einander auftretenden Partialtöne als bestimmte Klangfarbe einer Violine, einer Clarinette, der menschlichen Stimme u. s. w.

Dem Gehörten zufolge kommen also vermittelst der Cortischen Gebilde die gleichgestimmten Fasern des Hörnerven in ähnlicher Weise in's Mitschwingen, wie die gleichgestimmten Saiten eines offenen Claviers, in welches man einen gewissen Klang, einen Vocal o. dgl. hinein tönen lässt (§. 8, *d*).

b) Für die hohen Nebentöne in den Geräuschen und nicht musikalischen Klängen sind vielleicht die Fasern der Ampullen und des Vorhofes entsprechend gestimmt und regen die zugehörigen Nerven zum Mitschwingen an.

c) Die vorhin entwickelte Hypothese von Helmholtz über die Empfindung der Töne und Klangfarben ist also eine Anwendung jener Meinung über die Farbenempfindung, wie sie Thomas Young ausgesprochen hat. Nach diesem soll es im Sehnerven Fasern geben, welche nur für die Wellenlängen

im Roth, andere, welche nur für die Schwingungen des Blau, und noch andere, die nur für die Vibrationen des Violett gestimmt seien. Die Gesetze der Farbenmischung ergeben sich dann in ähnlicher Weise wie vorhin bei jenen für die Tonmischung oder für die Klangfarbe. Es bleiben dann sowohl für die Fasern des Hör- wie des Sehnerven nur die Unterschiede stärkerer oder schwächerer Erregung übrig.

d) Diese Hypothesen sind von der größten Bedeutung für die Physiologie. Sie bestätigen Johann Müller's Lehre von den specifischen Energien der Sinnesnerven[27]) und führen sie einen Schritt weiter. Der eben genannte Meister in der Physiologie hat gezeigt: Der Unterschied der verschiedenen Sinnesempfindungen liegt in den verschiedenen Nervengebilden, welche die Reizungen empfangen, und ist von der äußeren Einwirkung unabhängig.

So bringen z. B. die Sehnerven, sie mögen durch Licht, Druck, Zerrung u. s. w. erregt werden, stets nur eine Lichtempfindung; die Tastnerven immer nur Tastempfindungen, nie Licht- oder Gehörsempfindung. Während das Ohr die Vibration einer Stimmgabel als Ton wahrnimmt, unterscheidet der Tastsinn nur ein intermittierendes Stoßen.

16. Zusammenfassung. a) Das Vorhandensein von Obertönen in einigen Klängen und besonders in jenen der Saiten und die Hauptgesetze ihres Erscheinens waren eine schon längere Zeit bekannte Thatsache. Helmholtz hat aber dieses höchst interessante und äußerst wichtige Phänomen eingehender studiert; er hat mit Hilfe der Resonatoren, eines Stimmgabel-Apparates und noch anderer Mittel das fast allgemeine Vorkommen der Obertöne in den Klängen nachgewiesen; er hat dargethan, dass jeder musikalische Klang, er mag von einem musikalischen Instrumente (einem Clavier, einer offenen Orgelpfeife) oder einer Stimme herrühren, mehrere ziemlich kräftige, aber dabei niedrige Obertöne besitzen müsse, und dass die höheren Obertöne beiläufig vom 6ten an entweder gar nicht oder nur schwach tönend vorhanden sein dürfen, wenn eine bessere Klangfarbe zu Stande kommen soll. Dieser Klang

ist voll, wenn der Grundton die Obertöne an Stärke übertrifft; im entgegengesetzten Falle ist er leer.

1. Bei Anlegung der vielverpönten und verkannten „Mixturregister“ der Orgeln hat die Praxis, wie so häufig, das Rechte getroffen und ist der Theorie vorangeeilt. Bei den „Registern“ der Orgeln ist vorgesehen, dass mittelst einer einzigen Taste gleichzeitig mehrere Pfeifen geöffnet werden, welche einem Grundtone und seinen ersten, niederen Obertönen, und zwar höchstens bis zum fünften entsprechen. Und weil bei allen guten musikalischen Klangfarben die Theiltöne um so schwächer werden, je höher sie sind, so müssen auch bei guten Registern die tieferen Einzeltöne der zu erzeugenden Klangfarbe durch gleichgestimmte Pfeifen verstärkt werden.

2. Bei den Registern wird also in ähnlicher Weise eine gewisse musikalische Klangfarbe erzeugt, wie beim Stimmgabel-Apparat von Helmholtz (§. 13, *d*) und die Registerklänge geben ein gutes Bild für jeden musikalischen Klang, den man sich in ähnlicher Weise zusammengesetzt denken muss, wenn er auch nur von einem einzigen Instrumente, z. B. von einer einzigen Saite herrührt.

b) Die höheren Obertöne, das sind jene über den 6ten oder 7ten hinaus, machen die Klangfarbe zu scharf und zu rauh. Die Ursache hievon liegt in der Dissonanz, welche diese höheren Obertöne miteinander geben, und wir werden weiterhin darauf zurückkommen. Sind diese höheren Obertöne schwach tönend wie in den Klängen der Streichinstrumente, der Zungenpfeifen, Oboe, Fagott, Physharmonika und in der menschlichen Stimme, so sind die entsprechenden Klangfarben für die Musik nicht nur verwendbar, sondern zur Erweiterung des musikalischen Ausdruckes sogar nothwendig; sind hingegen diese hohen Obertöne stärker, wie z. B. bei den Klängen der Blechinstrumente, so eignen sich diese schreienden Klangfarben nur für die Effectwirkung der Orchester. Das Hinzutreten noch höherer und stärkerer Obertöne bewirkt so viele Dissonanzen, dass der Klang musikalisch unbrauchbar und zum „Geräusch“ wird.

c) Die wirklich einfachen Töne kommen nur sehr selten vor und zwar bei Stimmgabeln, welche vor gleichgestimmten Resonanzröhren tönen (§. 2, Note 3) und bei den schwach angeblasenen, weiten, gedeckten Orgelpfeifen. Solche Töne klingen zwar weich und angenehm, aber zu schwach und, wenn

sie tief sind, zu dumpf; daher ist ihre musikalische Wirkung auch nur sehr gering.

d) Klänge, welche nur die ungeradzahligen Obertöne enthalten, haben etwas Hohles; hieher gehören die engen und gedeckten Orgelpfeifen, die Claviersaiten, wenn sie in der Mitte angeschlagen werden. Beim Vorhandensein einer größeren Anzahl ungerader Obertöne, wie z. B. bei der Clarinette, wird die Klangfarbe „näselnd."

II.

Vielstimmige Sirenen.

(Schwebungen. — Consonanz. — Dissonanz. — Combinationston.)

17. Schwebungen und Stöße. Wenn man von zwei im Einklange stehenden Stimmgabeln, Saiten oder Pfeifen, die eine um ein Geringes verstimmt und dann beide gleichzeitig zum Tönen anregt, so lässt sich ein allmähliges und regelmäßiges Stärker- und Schwächerwerden des Zusammenklanges vernehmen. Dieses periodische, regelmäßige Schwanken der Tonstärke heißt das „Schweben" oder die „Schwebung" [1]) der Töne. Die größte Tonstärke dieser Schwebungen oder jede dabei stattfindende einzelne Schwellung der Tonintensität wird der „Stoß" oder „Schlag" genannt.

Eine geringe Verstimmung der Stimmgabel bewirkt man durch leichte Verrückung ihres Stimmungsschiebers (pg. 25), wenn sie einen solchen haben, oder durch Ankleben eines Stückchen Wachses an die Zinke einer derselben u. dgl. m. Ähnlich macht man es bei Saiten, oder man ändert bei letzteren die Spannung um weniges. Bei Pfeifen geht man wie beim Stimmen derselben vor. Stimmgabeln und gedeckte Pfeifen geben besonders deutliche Stöße.

18. Das Gesetz bezüglich der Geschwindigkeit der Stöße. Scheibler [2]) hat durch höchst sorgsame und mühevolle Versuche nachgewiesen: „Die Zahl der Stöße ist gleich dem Unterschiede der Anzahl der doppelten Schwingungen, beide auf die nämliche Zeit bezogen, und ein Hin- oder ein Hergang des schwingenden Körpers, als eine einfache Schwingung genommen." Differiren z. B. zwei Töne um acht doppelte Schwingungen in der Secunde, so hört man acht Stöße. Je weiter daher zwei Töne in ihrer Höhe von einander abstehen, desto mehr

Stöße folgen in derselben Zeit aufeinander, desto kürzer ist daher die Zeit, in welcher sie nacheinander kommen.

19. Erklärung der Stöße. Denken wir uns ein Pendel, das in einer Minute 60 hörbare einfache Schläge und ein zweites, welches in derselben Zeit 59 hörbare einfache Schläge macht.

Beide sollen gleichzeitig ihre Schläge beginnen. Im Anfange werden beide Schläge (wie beim Nonius oder Vernier die Anfangsstriche) zusammenfallen und werden einen doppelt starken Schlag geben. Die Schläge werden jetzt (wie beim Nonius die Theilstriche) immer mehr auseinander gehen, also schwächer werden; in der Hälfte der Minute werden sie am weitesten von einander, also am schwächsten zu hören sein.

Dann werden sie sich wieder nähern, immer stärker werden und endlich am Ende der Minute nochmals einen doppelt starken Schlag hervorbringen. In den folgenden Minuten wird sich alles wie vorhin verhalten. Und in ähnlicher Weise muss es auch bei den Schwingungen tönender Körper werden. Die „Stöße" sind das Zusammenfallen vollkommen gleich gerichteter Schwingungen.

Young und Scheibler (letzterer ohne von der Arbeit des ersteren zu wissen) haben diesen Vorgang durch ein Interferenzbild von Wellen recht deutlich veranschaulicht[3]).

20. Die Stöße und der Combinationston. Entstehen beim gleichzeitigen Erklingen zweier verschieden hoher, gleichartiger Töne in der Secunde doppelt so viele Stöße als zur Wahrnehmung eines Tones Schwingungen (p. 9, Note 2) erforderlich sind (im Minimum 33 Stöße in der Secunde), so kann nach Young, Hällström und Röber[4]) das Ohr die Zahl der einzelnen Stöße nicht mehr fassen; es hört aber dann statt der Tonschwellungen (Stöße) einen neuen, dritten Ton, den „Combinationston" (Tartini'schen Ton), welcher tiefer ist als jeder der beiden, einzelnen Töne, und zwar ist seine Höhe gleich dem Unterschiede der Schwingungszahlen der einzelnen Töne, ganz ähnlich, wie es sich mit der Anzahl von Stößen in der Zeiteinheit verhält (§. 18). Und weil man gleichzeitig erschallende Stimmen und Klänge deutlich unterscheidet und daraus

auf die ungestörte Superposition der entsprechenden Schallwellensysteme schließen, d. h. annehmen durfte, jedes einzelne Wellensystem verbreitet sich in dem schallleitenden Mittel, z. B. in der Luft, derart, als ob die anderen Wellenzüge gar nicht da wären, dass also die einzelnen Wellenzüge sich nicht beeinflussen; so wurde der Combinationston als eine subjective, von der eigenthümlichen Beschaffenheit des Gehörnerven abhängige Erscheinung angenommen. Der Combinationston kann nach Hällström mit einem der primären Töne einen Combinationston „zweiter Ordnung," und dieser mit einem der primären oder mit dem Combinationston erster Ordnung nochmals einen Combinationston „dritter Ordnung" u. s. w. bilden. Diese Combinationstöne „höherer Ordnung" sind jedoch schwieriger wahrzunehmen.

1. Ist m die Schwingungszahl des einen und n jene des anderen Tones, so ist $m - n$ die Schwingungszahl des Combinationstones, welcher also tiefer als jeder der erzeugenden (primären) Töne ist.

2. Am leichtesten vernimmt man den Combinationston, wenn die zwei erregenden Töne innerhalb derselben Octave liegen und dabei, wie bei den gedeckten Pfeifen oder Stimmgabeln, kräftig und anhaltend tönen. Und weil in der Regel der Grundton des Klanges stärker als seine Obertöne sind, so erzeugen gewöhnlich die beiden Grundtöne den Combinationston.

21. Neue Theorie der Combinationstöne von Helmholtz. Die von Helmholtz durch die mannigfachsten und zahlreichsten Versuche gestützte Theorie von Ohm und Fourier (§. 3), nach welcher das Ohr nur einfache, pendelartige Schwingungen der Luft als Ton zu empfinden vermag, verträgt sich nicht mit der bisher angenommenen Ansicht, dass auch beim Auftreten des Combinationstones die primären Schallwellen noch ungestört neben einander bestehen und dass mithin der Combinationston nur eine subjective Empfindung sei. Nach Ohm's Theorem kann nämlich das Ohr die zusammengesetzte Wellenbewegung stets nur in dieselben einfachen Wellen zerlegen, aus welchen sie besteht — und ein Combinationston wäre unmöglich.

So verhielte es sich auch, wenn die Obertöne durch Annahme einer anderen Schwingungsform als der pendelartigen erklärt werden könnten. Und selbst wenn Seebeck's Satz wahr

wäre, dass der einfache Ton durch verschiedene Formen der Luftbewegung hervorgerufen werden könne, würde derselbe bezüglich des Combinationstones theils auf unbestimmte Töne, theils auf solche führen, welche mit der Erfahrung im Widerspruch stehen. Durch derartige Gründe bewogen suchte Helmholtz nach einer Theorie des Combinationstones [5]), welche sowol mit der von ihm adoptierten Ohm'schen Theorie des Klanges als auch mit den bisherigen Erfahrungen über den Combinationston in Übereinstimmung sein sollte. Da die Combinationstöne nur beim Vorhandensein kräftiger, primärer Töne zu hören sind und ihre Stärke rascher als jene der erregenden Töne zuzunehmen scheint; so schloß Helmholtz, die Combinationstöne treten nur bei Wellenzügen von endlichen Amplituden auf. In der That gilt der mathematische Nachweis bezüglich des ungestörten Nebeneinanderbestehens verschiedener Wellenzüge nur, wenn ihre Schwingungen unendlich klein angenommen sind— und dann wäre auch wirklich nur eine subjective Empfindung des Combinationstones möglich.

Sobald man aber die Amplituden von zwar noch immer kleiner, aber doch endlicher Größe annimmt, so hat man (nach mathematischen Untersuchungen) neue Wellensysteme, welche eben die Combinationstöne als objective Erscheinung geben. Die mathematische Studie von Helmholtz hierüber lehrt, dass in der Regel diese Combinationstöne zu schwach sind, um ihre Objectivität mittelst einer auf Membranen hervorzurufenden Klangfigur nachzuweisen, dass sie aber jedenfalls das Trommelfell und die Gehörknöchelchen zu den entsprechenden Schwingungen anzuregen vermögen, die von hier aus wie die Schwingungen anderer Töne zum Gehörnerv verpflanzt werden.

1. Mittelst der später zu besprechenden mehrstimmigen Sirene (§. 25) lassen sich leicht kräftige Combinationstöne hervorrufen. Das objective Vorhandensein dieser Combinationstöne in der Luft lässt sich auf Membranen (§. 7, *a*) nachweisen durch eine entsprechende Sandfigur, oder durch die Bewegung eines Pendelchens (§. 7, *c*), welche bei keinem der einzeln erklingenden primären Töne erscheinen, wenn die Membrane für den zu erwartenden Combinationston gestimmt (gespannt) worden ist.

2. Entsprechend abgestimmte Resonatoren (§. 4—6) sind noch bequemer als die Membranen (§. 7) für den Nachweis der Objectivität selbst schwacher Combinationstöne. Denn die Resonatoren können nur einen Ton kräftigen, dessen pendelartige Schwingungen in der Luft des Instrumentes existieren, aber nicht einen Ton, der nur durch subjective Empfindung gehört werden soll.

3. Wenn jedoch der Combinationston zwar objectiv, aber doch erst im Ohre entsteht, versagt der Resonator seine Dienste.

22. *Differenz- und Summationstöne nach Helmholtz. a)* Differenztöne. Helmholtz findet auf mathematischem Wege, dass beim gleichzeitigen Erklingen zweier kräftiger, gleichartiger Töne Combinationstöne objectiv erscheinen, deren Tonhöhe tiefer als jene der primären Töne ist, und zwar gleicht ihre Höhe N dem Unterschiede der Schwingungszahlen $(m-n)$ der primären Töne, als Formel $N = m - n$. Er nennt diese Combinationstöne „Differenztöne"; es sind dies die längst bekannten Combinationstöne erster Ordnung.

b) Summationstöne. Überdies zeigte ihm aber seine Formel, dass es beim gleichzeitigen Erklingen zweier kräftiger, gleichartiger Töne auch Combinationstöne geben müsse, deren Höhe N_1 gleich der Summe der Schwingungszahlen der einzelnen Töne ist; als Formel $N_1 = m + n$. Diese Combinationstöne, welche er „Summationstöne" nennt, mussten dem mathematischen Ausspruch nach viel schwächer als die entsprechenden Differenztöne sein, und, wie sich von selbst versteht, höher als jeder der primären Töne. Von diesen Summationstönen lassen sich jedoch nur die ersten der in der mathematischen Reihe angedeuteten, und auch diese nur unter günstigen Umständen, wahrnehmen, und zwar bei der Physharmonika oder bei benachbarten Orgelpfeifen, bei welchen man das Ohr ihren Mundstücken nähert, und endlich mittelst der weiterhin (§. 25, *c*) zur Besprechung kommenden vielstimmigen Sirene.

c) Differenztöne höherer Ordnung. Was die Differenztöne höherer Ordnung betrifft, so hat Helmholtz gefunden, dass solche bei mäßiger Stärke der einfachen primären Töne zu schwach sind, um gehört zu werden. — Die deutlich hörbaren Combinationstöne höherer Ordnung

bei zusammengesetzten Tönen oder Klängen sind (nach Helmholtz) die Combinationstöne der Obertöne der primären Klänge.

23. Zusammenfassung der Gründe für die Helmholtz'sche Theorie der Combinationstöne. Es hat sich gezeigt, dass die älteren Theorien, nach welchen das Ohr in subjectiver Weise die Schwebungen zu einem neuen Tone summirt, gegen die Helmholtz'sche Ansicht an Stärke weit zurücksteht und zwar aus folgenden Gründen:

a) In vielen Fällen kann man das objective Dasein der Combinationstöne mittelst Membranen oder Resonatoren nachweisen (§. 21 Note 1 und 2).

b) Die Helmholtz'sche Theorie kann nicht bloß die Existenz der Summationstöne (der höher tönenden Combinationstöne) erklären, sondern sie hat sogar ihr Vorhandensein vorausgesagt.

c) Die älteren Hypothesen haben wol das Zusammentreffen des Differenz-Gesetzes sowohl bei Stößen als Combinationstönen für sich, aber sie erklären nicht, warum die Stöße selbst der schwächsten Töne so leicht zu hören sind, während die primären Töne beim Combinationstone stets kräftig sein müssen; ferner passen sie nur für Fälle, wo der Unterschied der Schwingungszahlen klein ist gegen den eigenen Werth der Schwingungszahlen.

d) Die älteren Theorien stehen auch in Widerspruch mit der von Helmholtz so gut begründeten Ohm'schen Theorie des Klanges.

24. Was wird aus den schnelleren Schwebungen? (Consonanz und Dissonanz). a) Es hat sich im vorigen gezeigt, dass nach den Untersuchungen von Helmholtz der Combinationston nicht aus den schneller werdenden Schwebungen hervorgehe, und dass das den Schwebungen und dem gewöhnlichen Combinationston gemeinsame „Differenz-Gesetz" wol nur ein zufälliger Umstand sein mag — was wird also aus den Schwebungen, wenn man ihre Geschwindigkeit wachsen lässt? Dies kann nicht dadurch bewirkt werden, dass man das Intervall der primären, einfachen Töne größer werden lässt, weil

die Schwebungen nur dann deutlich sind, wenn die erzeugenden Töne in der Höhe einander nahe stehen. Zur Vermehrung der Schnelligkeit der Schwebungen muss man also die einander nahe liegenden, primären, einfachen Töne in den höheren Tonleitern (beiläufig von der Octave c^1 angefangen) wählen.

b) Wenn man mittelst zweier Stimmgabeln, welche vor passenden Resonanzröhren stehen, oder mittelst zweier schwach angeblasenen, weiten, gedeckten Orgelpfeifen Schwebungen einfacher Töne erzeugt, so kann man theils durch successive Verstimmung an denselben Gabeln oder Pfeifen, theils durch neu gewählte, höheren Octaven angehörige Gabeln und Pfeifen die Zahl der Schwebungen von 4 bis etwa 132 in der Secunde verfolgen. Wenn die Zahl der Schwebungen per Secunde nahe an 20 kommt, hört zwar die Möglichkeit des Zählens auf, aber man kann noch immer, bei gespannter Aufmerksamkeit und langer Übung, die Stöße unterscheiden. Dies wird freilich immer schwieriger, je rascher die Schwebungen einander folgen. Indessen hat Helmholtz nachgewiesen, dass wenigstens noch 132 Stöße in der Secunde als solche unterscheidbar sind, dass sie also nicht in einen Combinationston übergehen. Die Anzahl der schnelleren Schwebungen wird aus dem Unterschiede der primären Töne berechnet. Von beiläufig 132 Schwebungen in der Secunde werden dieselben unhörbar.

c) Die Empfindung bei sehr langsamen Schwebungen (4 bis 6 in der Secunde) ist nicht unangenehm, und es wird davon für das Tremuliren des Tones bei gewöhnlichen und Drehorgeln, ferner bei der Physharmonika Gebrauch gemacht. Wie aber die Stöße so zahlreich werden, dass sie nicht mehr gezählt werden können, so machen sie die Tonempfindung rauh, wirr und knarrend — sie werden dem Ohr unangenehm und bewirken die „Dissonanz". Diese Rauhigkeit ist, nach Helmholtz's Studien, bei etwa 33 Schwebungen in der Secunde am größten, und nimmt von hier nach auf- und abwärts wieder ab. Die Anzahl der Stöße ist jedoch nicht allein maßgebend auf die Deutlichkeit der Schwebungen und auf die Rauhigkeit der entsprechenden Empfindung. Helmholtz hat nämlich gefunden,

dass dieselbe Zahl der Schwebungen in verschiedenen Gegenden der Tonleiter verschiedene Grade der Deutlichkeit und Rauhigkeit zulassen.

d) Das Unangenehmere der rascheren Stöße erklärt sich aus ihrem intermittierenden Wesen. Es ist auch bei den anderen Sinneseindrücken mit intermittierenden Reizungen nicht anders. Eine flackernde Flamme, ein rasch bewegtes Gitter u. dgl. m. wirken ebenfalls unangenehm auf das Auge. Die Ursache hievon liegt höchst wahrscheinlich in der zu grossen Anstrengung des betreffenden Organes. Wenn nämlich ein Sinnesreiz fortdauert, so wird die Empfindlichkeit der entsprechenden Nerven bald abgestumpft und also vor zu heftiger Erregung bewahrt. Bei unterbrochenen Sinneseindrücken hingegen ruhen die Nerven immer wieder aus, wodurch dann die Reizungen stets auf's neue kräftig, mithin im Ganzen zu heftig und zu anstrengend werden.

e) Bei zusammengesetzten Tönen oder „Klängen" geben die einander nahe liegenden Obertöne und ebenso die wenig auseinander stehenden Combinationstöne Schwebungen, welche dann Ursache der „Dissonanzen" werden und je nach ihrer Zahl und ob sie in den höheren oder tieferen Lagen vorkommen (vergl. *c* dieses §.) verschiedene Grade des Rauhen und Wirren bewirken. Bei den meisten musikalischen Klängen sind die harmonischen Obertöne so stark, dass vorzüglich ihre Schwebungen die Ursache der Dissonanz sind; von den Combinationstönen kommen dabei nur die ersten und mithin kräftigen Differenztöne in Betracht.

f) Dem Gehörten zufolge ist die Consonanz eine stetige, die Dissonanz eine unterbrochene Tonempfindung. Wenn man nun die Klänge, welche Consonanzen miteinander geben, analysiert; so findet sich, dass diese Consonanzen um so vollkommener sind, je mehr ihre Obertöne vollständig zusammenfallen, je weniger sie also Schwebungen erzeugen können. Und dies ist dann der Fall, je einfacher das Verhältnis der Grundtöne der betreffenden Klänge gegeneinauder ist. Es leuchtet aber aus dem über die Schwebungen bisher Gehörten

ein, dass auch die höhere oder tiefere Lage eines Intervalles und ferner die Klangfarbe von Einfluss auf den Grad der Vollkommenheit der Consonanz sein muss.

1. Die Prim mit der Octave, Doppeloctave und der Duodecime geben „absolute Consonanzen", weil alle ihre Obertöne zusammenfallen, also keine Schwebungen entstehen.

2. Die Prime mit der Quinte und Quarte geben „vollkommene Consonanzen", weil die nicht zusammenfallenden Obertöne zu weit auseinander stehen, um störende Schwebungen zu erzeugen.

3. Die Prime mit der großen Sext und großen Terz geben „mittlere Consonanzen", weil ihre Obertöne, besonders in mittleren Lagen, schon störende Schwebungen geben.

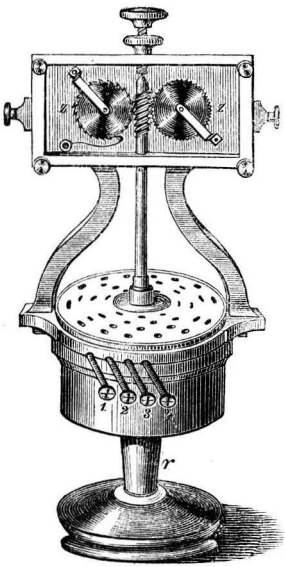
4. Noch „unvollkommenere Consonanzen" liefert die Prim mit der kleinen Sext und kleinen Terz, wegen der größeren durch die Schwebungen entstehenden Rauhigkeit.

25. *Vielstimmige Sirene von Dove.* *a)* Das Princip der Sirene zur Erzeugung eines einzigen Tones in der Zeiteinheit mittelst eines gezahnten Rades von Savart oder einer in ähnlicher Weise durchlöcherten und von einem Luftstrome herumgetriebenen Metallscheibe von Cagniard de la Tour [6]) ist bekannt genug.

Um gleichzeitig mehrere Töne zu erzeugen hat Savart an gemeinschaftlicher Axe mehrere Räder angebracht, welche je eine andere, verschiedenen Tönen entsprechende Anzahl von Zähnen besitzen und gegen welche federnde Streifen schlagen, oder gegen welche man durch Röhrchen Luft treibt. Opelt [7]) und später in ähnlicher Weise A. Seebeck [8]) haben mehrstimmige Sirenen dadurch hergestellt, dass eine kreisrunde Papp- oder Metallscheibe, welche in concentrischen Kreisen je eine andere, für verschiedene Töne berechnete Anzahl von Löchern zeigt, durch passende Umdrehungsmittel (einfache Uhrwerke u. dgl. m.) herumgetrieben wird und bei welcher man zwei oder mehrere der Löcherreihen gleichzeitig mittelst zugehöriger Röhren gleichmäßig anbläst, wodurch zwei oder mehrere Töne gleichzeitig auftreten. Geschieht das Ansprechen einer solchen Sirene von einer und derselben Seite und haben die Löcher von zwei in Anspruch genommenen Reihen

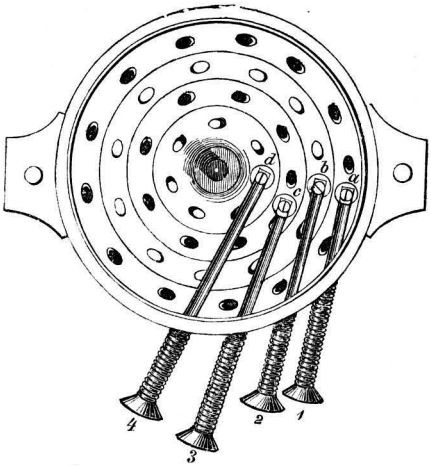
ein Verhältnis, wie es für das Tonverhältnis zweier primitiver Töne nothwendig ist, welche einen Combinationston erzeugen sollen, so tritt auch hier ein Combinationston auf. Ein solcher ist jedoch nur äußerst schwer wahrnehmbar, weil die erzeugenden Töne selbst nur schwach sind. Dieser Übelstand und die Nothwendigkeit, verschieden geformte Röhren für das Anblasen derartiger Sirenen zu besitzen, haben Dove[9]) auf den Gedanken gebracht, das Princip der mehrstimmigen Sirene auf jene von Cagniard de la Tour anzuwenden. Dove's mehrstimmige Sirene (Fig. 7) unterscheidet sich von letzterer im Wesentlichen nur dadurch, dass gleichzeitig 2, 3 und auch 4 verschieden hohe Töne und der entsprechende Combinationston hervorgerufen werden können.

Fig. 7.



b) Die zum Rotieren bestimmte Platte sowol als auch die darunter befindliche, fixe Deckplatte des weiteren Cylinders (des „Windkastens") haben in dem ersten, von dem Rande gezählten Kreise 16, im zweiten 12, im dritten 10 und im vierten 8 Öffnungen, welche wie bei der gewöhnlichen Sirene Cagniard de la Tour's schief gebohrt sind. Die schrägen Bohrungen der fixen Platte sind gegen jene an der beweglichen Platte unter einem nahezu rechten Winkel gestellt, damit die durchströmende Luft kräftigst auf die drehbare Scheibe wirken könne. Unterhalb der fixen, in der erwähnten Weise mit Öffnungen versehenen Scheibe befinden sich (Fig. 8) vier Ringe *a*, *b*, *c*, und *d*, welche genau an einander passen und mittelst daran befestigter Messingstäbchen 1, 2, 3 und 4 drehbar sind. Der innerste Ring *d* lässt sich zwischen einer kleinen im Centrum an der fixen Platte befestigten Kreisscheibe und zwischen dem Ringe *c* verschieben; in ähnlicher Weise kann man den äußersten Ring *a* zwischen den festen Rand und dem Ringe *b* bewegen. Der

Fig. 8.



erste Ring *a* hat 16, der zweite *b* 12, der dritte *c* 10 und der vierte *d* 8 Öffnungen, deren Bohrung die nämliche Richtung wie jene in der fixen, darüber befindlichen Deckplatte haben. Die herausragenden Enden der Stäbchen 1, 2, 3 und 4 sind mit Spiralfedern umgeben, durch welche sie nach außen so lange gedrückt werden, bis ein an jedem Stäbchen quer befestigtes Schräubchen an der inneren Seite des Randes am Windkasten Halt gebietet. Ist dies der Fall, so fallen die Bohrungen der Ringe auf die massiven Stellen der darüber liegenden fixen Deckplatte und die Luft kann aus dem Sirenengehäuse („Windkasten“) nicht entweichen. Wird aber eines der Stäbchen mit der Hand nach innen gedrückt und in dieser Stellung festgehalten, so wird der damit verbundene Ring so gedreht, dass seine Öffnungen mit der gleichen Anzahl Öffnungen der Deckplatte zusammenfallen und die Luft des Windkastens fließt dann aus. Durch gleichzeitiges Hineindrücken zweier oder mehrerer Stäbchen, kann man also zwei oder mehrere der Sirenentöne combinieren, mithin ihr Zusammenfallen und auch den entsprechenden Combinationston hervorrufen. Und weil bei dieser Sirene die einzelnen Töne sehr

kräftig sind, so ertönt der entsprechende Combinationston laut und deutlich.

c) Auch die von Helmholtz voraus berechneten und dann entdeckten „Summationstöne“ (§ 22, *b*) lassen sich mittelst der Dove'schen vielstimmigen Sirene sehr deutlich wahrnehmen. Da diese Töne selten in der Harmonie des Dur-Accordes bleiben, wie es meistens bei den Differenztönen der Fall ist; so machen sie oft die Accorde der vielstimmigen Sirene rauh und widrig, besonders wenn darin Terzen oder kleine Sexten vorkommen.

26. Erklärung der Stärke der Combinationstöne bei der Dove'schen vielstimmigen Sirene. a) Die Ursache der grossen Stärke der Combinationstöne bei der Dove'schen Sirene ist folgende: die Luft im cylindrischen Luftgehäuse („Windkasten“) der Sirene geräth in Schwingung, sobald ein Theil Luft durch die Öffnungen ausströmen kann. Es tritt dann eine Verdünnung der Luft ein, der bald wieder, beim Verschluss der Öffnungen, eine Verdichtung folgt.

Beim gleichzeitigen Öffnen zweier Lochreihen bilden sich zweierlei, den beiden Sirenentönen entsprechende Schwingungen, so dass die bei der einen Lochreihe ausströmende Luft bereits durch den zur anderen Lochreihe gehörigen Ton eine schwingende Bewegung besitzt. Dadurch bilden sich in der freien Luft die dem Combinationston zugehörigen Wellen und der Ton wird laut und kräftig. Seine Objectivität lässt sich dann mittelst Membranen oder Resonatoren nachweisen. (§. 21, 1 u. 2.)

b) Überhaupt ist für die Entstehung starker Combinationstöne nöthig, dass die primären Töne am Orte ihrer Erzeugung eine abgeschlossene, enger begrenzte Luftmenge gemeinschaftlich haben, welche durch ihre gegenseitige Einwirkung in schwingende Bewegung versetzt werde. Deshalb sind auch die durch die Physharmonika erzeugten Combinationstöne kräftig, weil auch hier die im gemeinsamen Behälter enthaltene Luft in ähnlicher Weise wie bei der Sirene Dichtenänderungen erleidet. Da aber in diesem Falle der Windkasten viel größer, also die Lufterschütterungen darin viel kleiner als bei der

Dove'schen Sirene ist, so sind auch die mit Hilfe der Physharmonika hervorgerufenen Combinationstöne, obschon an und für sich laut und deutlich, im Vergleiche mit jenen, welche mittelst der Dove'schen Sirene erregt werden, viel schwächer, so dass sich ihre Objectivität mittelst Membranen gar nicht, mittelst der Resonatoren nur zum Theile nachweisen lässt.

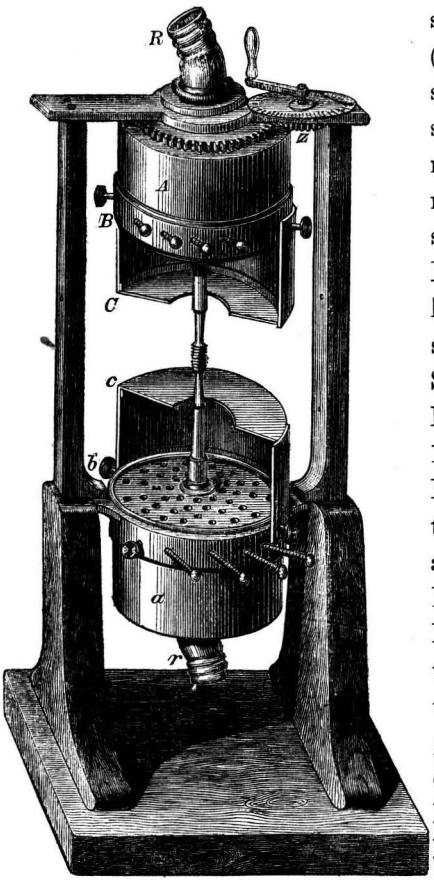
1. Jetzt ist auch klar, warum zwei Violinen, zwei Blaseinstrumente, welche getrennt angesprochen werden, zwei Singtöne nur schwache Combinationstöne geben.

2. Die vielstimmige Sirene Dove's wurde vom Mechaniker Sauerwald in Berlin zuerst angefertigt. Durchmesser der drehbaren Scheibe 3", Höhe des Cylinders $1\frac{1}{2}$", Höhe der Drehaxe sammt Endschrauben 5".

27. *Vielstimmige Doppelsirene von Helmholtz. a)* Interferenz der Schallwellen. Das Zusammentreffen von Wellen und ihr Aufeinanderwirken, heisst im Allgemeinen ihre „Interferenz". Sind die Wellenlängen zweier gleichzeitig erklingender Töne ungleich, so können sie bei einem etwas größeren Unterschiede der Höhe der entsprechenden Töne durch Interferenz die Combinationstöne erregen (§. 20), oder wenn der Unterschied der Tonhöhe nicht bedeutend ist, die „Schwebungen" (§. 19) bewirken. Sind jedoch zwei Schallwellensysteme einander vollkommen gleich, aber bezüglich ihrer Phasen um eine ungerade Anzahl halber Wellenlängen verschieden, so fällt je eine Verdichtung mit je einer Verdünnung der Luft zusammen und es ergibt sich überall die natürliche Dichte der Luft. Die Wellen heben sich in allen Puncten auf und es wird kein Ton gehört, obschon zwei vollkommen gleiche Töne factisch erregt werden. Beträgt jedoch der Phasenunterschied der den beiden gleichen Tönen entsprechenden Wellenzüge eine gerade Anzahl halber Wellen, so tritt eine Tonverstärkung ein. Das Zusammentreffen ganz gleicher Schallwellen mit einer Differenz von einer ungeraden oder geraden Anzahl halber Wellenlängen und die entsprechende Aufhebung oder Verstärkung der Töne heisst „Interferenz im engeren Sinne". In letzterer Bedeutung werden wir in diesem Buche das Wort „Inter-

ferenz“ stets gebrauchen. Zur Nachweise der Combinationstöne und der Schwebungen haben wir schon mancherlei Mittel kennen gelernt und auch für die Erzeugung der Interferenz des Schalles [10]) gibt es viele Methoden; am besten jedoch eignet sich für das Hervorrufen der Interferenzerscheinungen des Schalles und ebenso für die Ableitung der Gesetze der Schwebungen die vielstimmige von Helmholtz erdachte Doppelsirene [11]). (Fig. 9.)

Fig. 9.



b) Die Helmholtz'sche vielstimmige Sirene (Fig. 9) besteht im wesentlichen aus zwei Dove'schen mehrstimmigen Sirenen (§. 25), welche ihre mit vier Lochreihen versehenen Decken in einiger Entfernung gegen einander kehren. Die vier concentrischen Reihen der oberen Sirene haben 9, 12, 15 und 16 Löcher, die der unteren 8, 10, 12 und 18 Bohrungen. Die zum Rotiren bestimmten Platten befinden sich an einer gemeinschaftlichen Drehaxe, welche in ihrer Mitte mit einer das Zählwerk treibenden Schraube versehen ist. Die messingenen Röhren R und r leiten den Luftstrom aus einem Blastisch in die Windkästen. Da der obere Windkasten behufs einiger Versuche um seine geometrische Axe drehbar gemacht werden soll, so dient

für diesen Zweck das Windrohr R als Drehaxe, und zwar in folgender Weise: Das messingene Luftrohr R geht unbeweglich durch den oberen Querbalken des Gestelles und reicht mit seinem geschlossenen Ende bis in die fixe Deckplatte B des oberen Windkastens A. Der Boden und die Decke des letzteren sind mit Ausschnitten versehen, welche genau an das Windrohr passen, so dass der Kasten A um das Rohr R sich luftdicht drehen lässt. Damit aber die Luft aus dem zur Drehaxe gewordenen am unteren Ende aber geschlossenen Windrohre R in den Windkasten gelangen könne, ist dasselbe an dem im Hohlraume des Windkastens befindlichen Stücke mit weiten Seitenlöchern versehen. Den unteren Verschluss des Windrohres bildet eine Schraube, welche nach außen eine mit dem Centrum der fixen Deckplatte zusammenfallende Vertiefung zeigt, die als Lager für die Drehaxe der beweglichen Platten dient. Eine ähnliche durch eine Schraube regelbare Pfanne für die Drehaxe der zum Rotiren bestimmten Scheiben besitzt die untere Deckplatte in ihrem Centrum. Die Rotation des oberen Windkastens wird dadurch bewirkt, dass bei der Drehung der aus der Fig. 9 ersichtlichen Kurbel das damit verbundene Getriebe z und das in letzteres eingreifende, am Boden des Kastens A befestigte Zahnrad in die entsprechende Bewegung geräth. Ein an der Kurbel befestigter Zeiger (Fig. 9) gibt den Werth des jedesmal beschriebenen Winkels auf einem fixen Theilkreise an.

1. Das Zählwerk ist ähnlich wie bei der gewöhnlichen Sirene von *Cagniard de la Tour* oder (Fig. 7) wie bei der *Dove*'schen vielstimmigen Sirene eingerichtet. Es ist in der Zeichnung weggeblieben.

2. Das Windrohr R ist an jenen Stellen, wo sich der Windkasten mit seinen im Boden und in der Decke befindlichen Pfannenlagern anschließt, konisch verlaufend.

3. Auch die Pfannen der in scharfe Spitzen auslaufenden Drehaxe der drehbaren Scheiben sind konisch vertieft.

4. Diese Sirene wurde zuerst vom Mechaniker Sauerwald in Berlin angefertigt.

c) Die Grundtöne des Sirenenklanges werden durch cylindrische, gleichgestimmte Resonatoren BC und bc so verstärkt,

dass dadurch die Obertöne nahezu ausgeschaltet werden (vergl. §. 2, Note 3). Der Sirenenton gleicht dann nahezu einem Hornton. Diese Sirenen-Resonatoren sind namentlich beim Studium der Interferenz-Erscheinungen an dem in Rede stehenden Instrumente zu gebrauchen.

Die Resonatoren der Sirene werden als hohle Halbcylinder aneinander passend an das Instrument geschraubt.

28. *Interferenz-Experimente mittelst der Helmholtz'schen mehrstimmigen Doppelsirene.* *a)* Es versteht sich von selbst, dass man jede einzelne der beiden Sirenen wie die Dove'sche vielstimmige Sirene gebrauchen, und mithin durch gleichzeitiges Anblasen zweier Töne auf einer und derselben Scheibe die Differenz- und Summations-Combinationstöne sehr kräftig und objectiv hervorrufen kann (§. 25).

b) Versucht man die Combinationstöne durch Anblasen auf beiden Scheiben zu erzeugen, so treten sie nur sehr schwach hervor (§. 26). Durch Drehung des oberen Kastens kann man aber einen beliebigen Phasenunterschied zwischen beiden primären Tönen bewirken und die daraus sich ergebenden Erscheinungen beobachten. Das Nähere hierüber soll im Folgenden erörtert werden.

c) Gesetzt es werde sowohl an der oberen als auch unteren Scheibe der Doppelsirene (Fig. 9) die Reihe mit 12 Löchern gleichzeitig angeblasen, und es machen die Scheiben so viele Umläufe in der Secunde, dass beide Sirenen den Ton *g* hören lassen. Liegen nun die Windkästen beider Sirenen derart, dass die Windstöße vollkommen gleichzeitig eintreten, so werden sowohl die Grund- als die zugehörigen Obertöne verstärkt, indem dabei je die gleichen Phasen zusammentreffen (§. 27, *a*).

Hat aber der obere Windkasten eine solche Lage gegen den unteren, dass vor dem gleichzeitigen Anblasen der zwölflöcherigen Reihen an beiden Scheiben je eine der zwölf Öffnungen der einen Sirene genau auf die Mitte des Abstandes zweier Öffnungen der Zwölferreihe an der anderen Sirene zielt; so unterscheiden sich beim gleichzeitigen Hervorrufen der entsprechenden Sirenenklänge die beiden Grundtöne um eine

halbe Wellenlänge; sie heben sich daher auf — es wird keiner derselben gehört. In gleicher Weise verhält es sich mit allen ungeradzahligen Partialtönen; denn auch bei ihnen beträgt der Phasenunterschied eine ungerade Anzahl halber Schwingungsdauern (§. 27, *a*). Der Unterschied der Phasen der höheren Octaven oder der geradzahligen Partialtöne hat jedoch unter diesen Umständen den Werth mehrerer ganzer Wellenlängen, weshalb diese verstärkt ertönen, wobei die erste höhere Octave am kräftigsten erscheint. Das Resultat unter den gemachten Bedingungen ist demnach: Der erwartete Grundton wird gar nicht gehört, dafür aber die höhere Octave. Der an beiden Sirenen gleichzeitig erzeugte Klang ist also im Ganzen genommen schwächer, als wenn er nur an einer der Sirenen erregt wird.

d) Die im vorigen (*c* dieses §.) vorausgesetzte Stellung des oberen Kastens gegen den unteren, bei welcher die Windstöße des einen Kastens genau in die Mitte zwischen jene des anderen fallen, wird hervorgebracht, wenn man jenen um 15° aus der Lage herausdreht, bei welcher alle Löcher der Zwölferreihe sowol an dem oberen als unteren Windkasten übereinanderliegen. Dies wird klar, wenn man bedenkt, dass die Bohrungen der Zwölferreihe um $\frac{360}{12} = 30^0$ von einander entfernt sind, und dass nach dem Verstellen des oberen Kastens die Öffnungen der einen fixen Deckplatte auf die Mitte des Abstandes je zweier Öffnungen von der anderen Deckplatte zielen sollen.

Um nun die Verschiebung des oberen Kastens um 15° zu bewirken, ist das Verhältnis der Verzahnung derart gewählt, dass man die Kurbel um 45° drehen muss. Bei einer Drehung der Kurbel um einen rechten Winkel, verschiebt sich demnach der Kasten um 30°. Im ersten Falle erscheint der Sirenenklang geschwächt, im zweiten verstärkt. Bei einer Drehung der Kurbel um einen vollen Kreis gibt es also vier Stellungen, bei welchen der Klang den ursprünglichen Grundton sowie die anderen ungeradzahligen Partialtöne einbüßt und

also schwächer und zwar mit der nächst höheren Octave erscheint; ebenso existieren aber auch bei einer ganzen Umdrehung der Kurbel vier Stellungen des Kastens, bei welchen der ganze Sirenenklang verstärkt auftritt.

Mittelst passender Resonatoren (§. 4 bis 6) findet man, dass in ähnlicher Weise der erste Oberton während eines Umlaufes der Kurbel acht mal verstärkt und geschwächt kommt, der zweite Oberton zwölfmal, der dritte Oberton sechzehnmal u. s. w., u. s. w.

29. Versuche über die Schwebungen mit Hilfe der Helmholtz'schen Doppel-Sirene. a) In den vorigen Paragraphen hatten wir es mit zwei ganz gleich hohen Tönen bei gleichen oder verschiedenen Schwingungsphasen zu thun. Im letzteren Falle waren zwar die Windkästen der Sirenen gegen einander verstellt, aber beide ruheten. Jetzt wollen wir zusehen, wie man mittelst der Doppel-Sirene zwei Töne hervorruft, welche miteinander Schwebungen geben, deren Höhe also von einander um ein Weniges abweicht. Zu diesem Behufe öffnet man an beiden Sirenen die gleichzahligen Lochreihen, z. B. wieder jene mit 12, und dreht den oberen Kasten langsam um seine Axe und zwar so, dass der Kasten in einer Richtung rotiert, welche jener der Scheibe entgegengesetzt ist. Da hiebei die Löcher der fixen Deckplatte jenen in der Drehscheibe entgegenkommen, so fallen sie früher aufeinander, als wenn beide Windkästen ruhen. Der Ton der oberen Sirene wird also etwas höher als jener der unteren, und weil bei dieser Drehung der oberen Sirene dieselbe durch jene vier Stellungen geht (§. 28), bei welchen der Sirenenklang abwechselnd stärker und schwächer wird, so treten Schwebungen auf, und zwar (§. 28, *d*) bei je einer vollen Umdrehung (360°) der Kurbel vier, die Scheiben mögen beliebig rasch rotieren, die Töne also beliebig hoch sein.

Wird der obere Kasten in seiner Bewegung während des „Stoßes" der Schwebung angehalten, so bleibt dieses eben stattfindende Maximum der Tonstärke andauernd; in ähnlicher Weise verhält es sich mit dem Minimum der Tonintensität.

b) Bei einer Umdrehung der Kurbel um einen Viertelkreis ergibt sich eine Differenz von einer Schwingung für beide Grundtöne der Sirene und gleichzeitig tritt ein Stoss auf (*a* dieses §.); bei einer Rotation der Kurbel um *n* rechte Winkel tritt demnach eine Differenz von *n* Schwingungen auf und zugleich werden *n* Stösse gehört. Daraus folgt das im Paragraph 18 ausgesprochene Differenz-Gesetz für die Stöße.

Die Doppel-Sirene führt also mit Leichtigkeit auf dieses Gesetz, welches Scheibler und Röber mit so grosser, höchst dankenswerther Mühe gefunden haben.

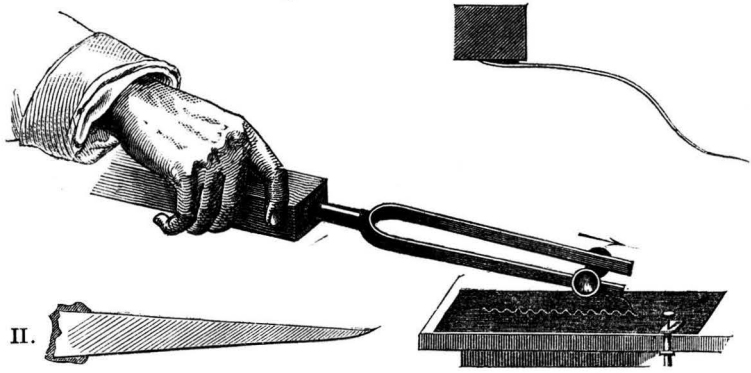
c) Wendet man bei der Doppel-Sirene, während man die Schwebungen erzeugt (*a* dieses §.), die cylindrischen Resonatoren *AB* und *ab* (Fig. 9) an, so sind die Stösse viel deutlicher als ohne dieselben. Im letzteren Falle stören die ebenfalls miteinander Schwebungen gebenden Obertöne durch ihre Stärke die richtige Wahrnehmung der Änderungen bezüglich der Ton-Intensität; dafür treten aber die Änderungen der Tonhöhe und Klangfarbe auffallender hervor.

III.

Die Tonschreibekunst, Phono- oder Vibrographie.

30. Phonautograph und Phonautogramm nach Weber. a) Der Tonschreibapparat. Denken wir uns (Fig. 10) an dem

Fig. 10.



freien Ende eines Stahlstabes oder oben an der Zinke einer Stimmgabel ein elastisch biegsames Metallfederchen oder einen Stift senkrecht zur Schwingungsebene befestigt. Bringen wir den Stab auf irgend eine Weise in's Tönen, also zum Schwingen, so wird auch das Federchen die Vibrationen mitmachen. Wenn man nun die Spitze des Federchens einen berußten Glasstreifen an dem einen Ende berühren lässt und dann den schwingenden Stab gegen das andere Ende, auf gerader Linie gleichmäßig fortführt; so zeichnet das Federchen, indem es den Ruß wegnimmt, recht deutlich seine Schwingungen auf, in Form einer längs jener Geraden fortlaufenden regelmäßigen Zikzak- oder Wellenlinie. In gleicher Weise wird dies geschehen, wenn man statt der Glasscheibe eine berußte Papier-

fläche anwendet. Eine jede Vorrichtung, welche in ähnlicher oder anderer Weise es möglich macht, dass ein tönender Körper seine Schwingungen selbst aufschreibt, heisst Phonautograph, Phonograph, Vibroautograph, Vibrograph.

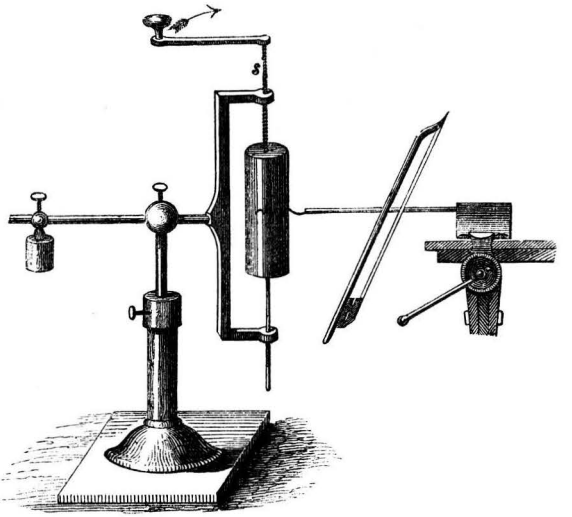
b) Tonschriften. Die so erhaltenen Zeichen wird man am besten mit „Tonzeichnung, Tonschrift, Phonautogramm, Phonogramm, Vibroautogramm, Vibrogramm“ benennen.

c) Beobachtet man auf passende Weise die Zeit, welche seit dem Anmerken eines bestimmten Punctes der Tonschrift bis zu einem andern Puncte am Phonogramme verflossen ist, so kann man auf diese Weise die dem Tone zukommende absolute Schwingungszahl ermitteln. Das schnellere oder langsamere Hinführen der Gabel bewirkt nur weitere oder engere Berge und Thäler der Wellenlinie und hat auf die Zahl der Schwingungen in der Secunde keinen Einfluss. Die Reibung des Federchens an der Schreibfläche kommt nicht in Betracht. Man bewirkt nämlich durch Verschiebung des Schreibstiel s und eines Ausgleichgewichtchens an dem tönenden Körper während des Schreibens den möglichst reinsten Ton, für den dann die erhaltene Schwingungszahl ohne weiteres gilt.

d) Das bisher Vorgetragene hat schon im Jahre 1830 der Hauptsache nach, Wilhelm Weber[1]) ausgesprochen. Und da, so weit die bisherigen Nachforschungen reichen, vor ihm Niemand einen solchen Gedanken geäußert hat, so scheint dieser geniale Forscher der Erfinder der Phonautographie zu sein.

31. Vibrograph nach Duhamel. Der erste in weiteren Kreisen bekannte Vibrograph ist (Fig. 11) das „Vibroskop“ von Duhamel[2]). Die Schreibfläche gibt hier ein berußter gläserner Cylinder, welcher mittelst einer Kurbel eine drehende, und vermöge der, an der Axe befindlichen Schraube (Fig. 11) eine fortschreitende, also im Ganzen eine schraubenförmige Bewegung erhält. Das Schreibfederchen muss in eine solche Lage gegen den Mantel des Cylinders gebracht werden, dass es sich

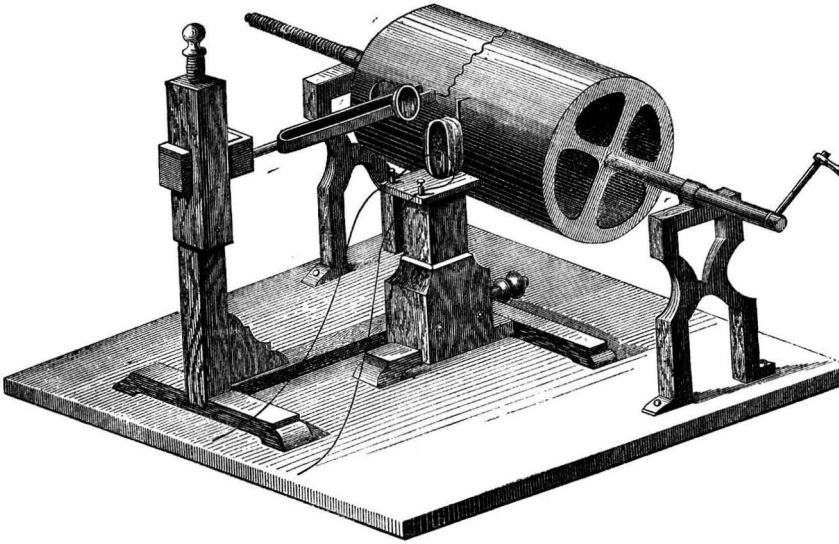
Fig. 11.



nur parallel zur Axe des Cylinders bewegen kann. Der Apparat ist so eingerichtet, dass man dem Cylinder leicht die zweckmäßige Lage gegen die schreibende Spitze geben kann. So lange das Federchen ruht, wird es auf dem durch die Kurbel in Bewegung versetzten Cylinder eine regelmäßige Schraubenlinie beschreiben. Sobald aber das Federchen in Schwingungen versetzt wird, macht es um jene Schraubenlinie (Fig. 11) als genaue Mitte lauter Wellenberge und Wellenthäler, von welchen je ein Berg und ein Thal auf eine Schwingung des Federchens und seines unmittelbaren Trägers kommen. Bezüglich der Bestimmung der absoluten Schwingungszahl verhält es sich wie im vorigen, und auch hier bleibt das schnellere oder langsamere Drehen des Cylinders ohne Einfluss auf die Anzahl der Schwingungen in der Zeiteinheit.

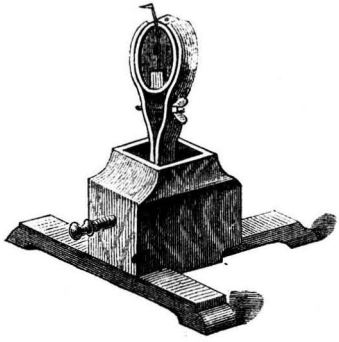
32. *Vibrograph nach König.* Man sieht sogleich, dass dem Duhamel'schen Vibrographen die Stabilität fehlt. Da es leicht ist, dem schwingenden Körper die gehörige Lage zu dem Cylinder zu ertheilen, so hat König dem Vibrographen die in (Fig. 12) dargestellte Form gegeben, bei welcher der festere Stand aller Theile besser gewahrt ist. Die Schreibfläche bietet

Fig. 12.



hier ein berußtes weißes Papier, welches außen an den Mantel eines hohlen Messingcylinders geklebt wird. Der Anfangs- und Endpunct der Zeit wird entweder durch ein mit einer federnden Spitze versehenes vorzügliches Chronometer (Fig. 13) oder durch die Spitze eines von einem Secunden-Pendel [3]) dirigierten Elektromagnetes (Fig. 12) an dem Cylinder gemerkt. Die letztere Methode ist vorzuziehen, weil bei einem Uhrwerk die Reibung der markierenden Spitze an dem Schreibcylinder, von nachtheiligem Einfluss auf den Gang des Zeitmessers sein könnte.

Fig. 13.



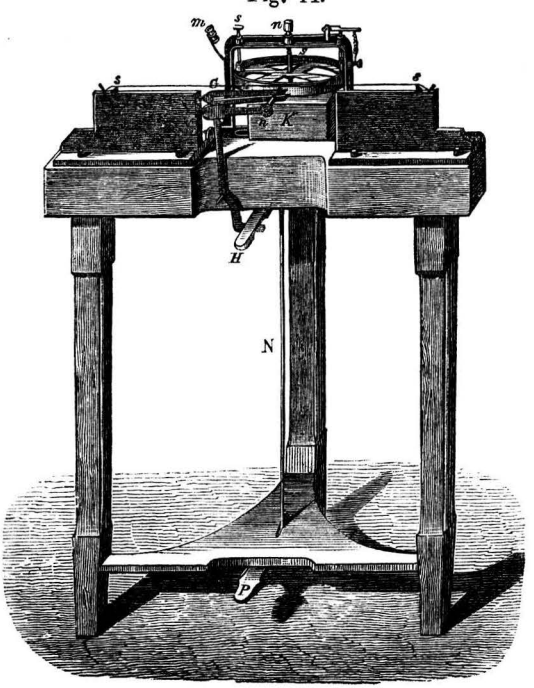
Man kann auch über den Schreibcylinder ein Secundenpendel so aufhängen, dass seine Schwingungsebene parallel zur Drehaxe, also senkrecht zur Tonschrift gerichtet ist. Dieses Pendel radiert dann mit seiner unteren Spitze, wenn es während der Anfertigung von Tonschriften schwingt, die Zeitmarken in die Tonschrift in sehr einfacher Weise ein. Ein beliebiges Pendel in solcher Weise angewendet, muss selbstverständlich auf

die Secunde oder auf das Secundenpendel durch Rechnung oder Versuche reduciert werden.

33. Vibrograph nach Wertheim. a) Bei dem Vibrographen nach Wertheim[4]) radiert der tönende Körper mittelst eines elastisch biegsamen Federchens seine Schwingungen im Ruße, welcher eine rasch rotierende, kreisförmige Glasscheibe (Fig. 14 u. 15) bedeckt. Auf derselben Schreibfläche, neben der vorigen Tonschrift zeichnet eine Stimmgabel, deren Schwingungszahl für die Secunde bekannt ist, ihre Vibrationen. Zählt man die Anzahl der Wellen beider Tonschriften, welche in demselben Abstande enthalten sind, so kann man aus der Vergleichung beider Schwingungsanzahlen sogleich die absolute Anzahl der Schwingungen des zu prüfenden Körpers finden.

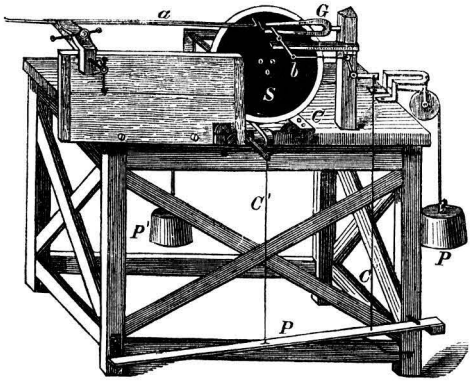
Ist z. B. n die Anzahl der verzeichneten Schwingungen der zeitmessenden Stimmgabel und N jene des zu prüfenden Körpers für die gleiche Zeit und ist a die Anzahl der Schwingungen der zeitmessenden Stimmgabel für je eine Secunde; so hat man $n : N = a : A$, und da hier das $A = x$ ist, so folgt $x = \frac{N}{n} . a$.

Fig. 14.



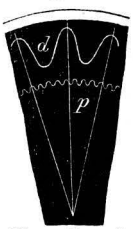
b) Der Wertheim'sche Apparat ist verschieden eingerichtet. Die Zeichnung der Wellenlinien geschieht entweder (wie bereits erwähnt) an einer Kreisebene (Fig. 15), wobei die Tonschriften concentrisch laufen oder (besonders für schwingende Saiten) die tönenden Körper und die zeitmessende Stimmgabel markieren ihre

Fig. 15.



Schwingungen an dem wohlgeschliffenen Mantel einer etwas hohen Glasscheibe (Fig. 14). An beiden Arten beginnt der Versuch damit, dass die Glasscheibe in Umlauf gesetzt wird. Dies geschieht durch Auslösen eines eigenen Räderwerkes. Sobald die Glasscheibe einen gleichförmigen Lauf zeigt, wird der zu untersuchende Körper in Schwingung versetzt. Hierauf bringt man vermittelst eines „Trittes“ (Pedals) *P* und eines damit in Verbindung stehenden Hebelwerkes die zeitmessende Stimmgabel in Schwingung und nähert gleichzeitig durch einen mit dem Pedale verbundenen Mechanismus die Glasscheibe dem Schreibfederchen der schwingenden Körper bis zur sanften Berührung. Durch feine Schrauben wird schon früher die Grenze der Annäherung der gläsernen Scheibe geregelt. Noch bevor ein ganzer Umlauf der Glasscheibe vollbracht ist, rückt man sie durch Auflassen des Trittes wieder zurück, und die Zählung der aufgeschriebenen Schwingungen kann beginnen.

Fig. 16.



c) Die Vergleichung der Schwingungszahlen geschieht bei concentrisch gelegenen Tonschriften, indem man (Fig. 16) einen Kreisausschnitt markirt, und die Anzahl der zwischen beiden Halbmessern enthaltenen Schwingungszeichen mit einander in's Verhältnis setzt (vergl. Anmerkung zu *a* in dieser Nummer). Bei Zeichnungen auf einer Mantelfläche geschieht dies durch Abzählen der Berge oder Thäler, welche zwischen zwei die Wellenkurven senkrecht schneidenden Geraden liegen.

d) Zum sicheren Zählen der einzelnen Schwingungen bediente sich Wertheim einer mit einem Fadenkreuz ver-

sehenen Loupe *m* (Fig. 14). Die Scheibe wurde in das Gesichtsfeld der letzteren beim besten Abstande gebracht und sehr langsam um die Axe gedreht.

e) Es ist klar, dass sich der vorzüglichste Theil des Wertheim'schen Phonographen, d. i. die zeitmessende Stimmgabel, auch bei den voran behandelten Vibroskopen und überhaupt bei jedem Phonautographen anwenden lässt. Man wird dadurch von der gleichförmigen Bewegung der Schreibfläche unabhängig. Im Übrigen sind, wie in die Augen springt, die vorigen Vibroskope viel einfacher, als der Wertheim'sche Tonschreiber.

34. Praktische Winke bezüglich der Vibrographie. a) Der Schreibstift. Die ersten Schreibfederchen waren hart und ähnlich den Schreibstiften. Sie waren mit Tinte getränkt und als Schreibfläche diente Papier. Da sich hiebei ein zu großer Widerstand herausstellte, so nahm man zu einem kleinen mit Tinte getränkten Pinsel seine Zuflucht. — Das Schreiben mit Tinte bietet mancherlei Übelstände. Diese sind jedoch vermieden beim Radieren im Ruße mittelst eines Streifens aus sehr biegsamem Blech, d. i. aus sogenanntem Metallpapier von der in Fig. 10, bei I in natürlicher Größe dargestellten Form.

Die Schreiblamelle befestigt man mit einem Stückchen Klebwachs (Wachs mit einem Zusatz von Terpentin) oder mit gemeinem Wachs an den tönenden Körper. Sie wird bei der Stimmgabel etwas gebogen, so dass sie von der Seite gesehen, die in Fig. 10, bei II dargestellte Figur bildet. Sie federt sehr leicht an der Schreibfläche.

b) Die Schreibfläche bieten entweder Glas oder weißes Papier, welche man vorher (§. 30) mit Ruß überzogen hat. — Sie werden als gerade Streifen (§. 33) oder Kreisflächen (Nr. 4) oder als Mantelfläche eines Cylinders (§. 31, 32 und 33) benützt. Das Papier wird so aufgespannt, dass es leicht wieder weggenommen werden kann. Dazu gibt es die mannigfachsten, bekannten Mittel.

Das Überziehen des Glases oder Papiers mit Lampenschwarz geschieht am einfachsten, indem man dieselben über

eine freie Ölflamme (ohne Zugglas) mehrere Male hin und her bewegt. — Um die Flamme rußender zu machen, setzt man dem Öl Terpentin, Theer, irgend ein Harz zu oder man zündet auch kurzweg Terpentin, Penzin, Camphin, Pinolin, Petroleum, Kolophonium, Kienholz u. dgl. an. Das Papier wird vorher mit Wasser schwach befeuchtet. Um die Mantelfläche des Schreibcylinders zu schwärzen, dreht man ihn kurze Zeit in einiger Entfernung über der rußenden Flamme.

Das Fixieren der Tonschrift auf dem Glasstreifen geschieht am besten durch einen schwachen Überzug von Collodium. Das Phonogramm auf Papier wird befestigt, indem man es mit starkem Alkohol benetzt und trocknen lässt. Hierauf wird die Rückseite des Papieres mit einem nicht lange naß bleibenden Firniss überstrichen. Man kann auch, nachdem der Alkohol abgedunstet ist, behufs einer dauerhafteren Fixierung das Papier durch Eiweißwasser oder durch eine Auflösung von Sandraque in Alkohol ziehen.

c) Tonschriften von Platten. Will man von tönenden Platten, während sich die Klangfiguren bilden, Tonschriften abnehmen, so befestigt man das Schreibstielchen an einer schwingenden Stelle der Platte am Rande, und gibt der Axe des Schreibcylinders eine lothrechte Lage, indem man ihn an irgend einem vertical gerichteten Stative befestigt.

d) Sollen von großen Stimmgabeln Tonschriften abgenommen werden, so bringt man sie durch kräftiges Streichen mit einem starken Bassbogen oder durch Schlagen mit einem weichen Körper, z. B. mit einem gepolsterten Lederkolben („Tampon“, Fig. 17) zum Tönen. Der in so hohem Grade ausgezeichnete Experimentator Scheibler[5]) erregte seine Gabeln durch Schlagen mittelst eines Bündels von etwa 20 Tuchscheiben, welche zwischen zwei kleineren Kupferreifen zusammengepresst und von einem Fischbeinstäbchen getragen wurden. Die Töne traten stets rein auf. Das Anschlagen mit einem harten Klöppel könnte bei so tief gestimmten Gabeln leicht neben dem Grundton auch noch harmonische Obertöne hervorrufen, was zu vermeiden ist.

Fig. 17.



Der obere cylinderförmige weiche Klöppel des Tampon (Fig. 17) besteht aus einem hölzernen cylindrischen Kern, von 2 Centimetern Durchmesser und aus darauf gewickelten 5 Lagen Filz, welcher nahezu eine Dicke von 2mm hat, so dass der ganze Durchmesser des oberen Klöppels an 3 Centimeter beträgt, von welchen 1 Centimeter auf die weiche Filzumhüllung kommt, die mit einem Überzug aus weichem Leder (starkes Handschuhleder oder dgl.) abschließt. Die Länge des Klöppels misst an 6cm die Länge des dünneren Fischbeinstäbchens ist bei 19cm, die des Griffes 10cm.

e) Das Umdrehen des Schreibcylinders soll möglichst gleichmäßig geschehen. Es genügt indes ein Umtreiben an der Kurbel mit der Hand. Ein bewegendes Uhrwerk ist hier nicht absolut nothwendig.

f) Das Wesen der Vibrographen lässt sich übrigens mit den billigsten Mitteln den Schülern verständlich machen. Eine ganz gewöhnliche Stimmgabel und ein Stück berußtes Papier genügen hiezu. Nichts destoweniger wird sich jede auch nur mäßig dotierte Lehranstalt eben sowohl mit einem besseren tonschreibenden Instrument versehen, wie in ihrer Sammlung gewiß eine Sirene nicht fehlt, die sich doch zur Noth ebenfalls durch eine mit Löchern versehene Pappscheibe oder durch ein Zahnrad und einem zugehörigen Blaseröhrchen oder durch ein in die Zahnlücken einschlagendes Kartenblatt vertreten lässt.

35. Leistungen der Vibrographen. Die bisher behandelten Vibrographen lassen sich zur Bestimmung der Schwingungszahl und Weite der Schwingungen der einfachen Töne sehr wohl benützen. Sie werden aber auch zusammengesetzte Schwingungsbewegungen schriftlich wiedergeben, wie sie in einem und demselben tönenden Körper stattfinden, z. B. in einer klingenden Saite, in einer angeschlagenen Stimmgabel, welche neben dem Grundtone noch harmonische Obertöne vernehmen lassen. Ebenso werden sie Schwingungsbewegungen anmerken, welche in dem nämlichen Körper senkrecht gegen ein-

ander vor sich gehen, wie z. B. in den Stäben von Wheatstones Kaleidophon (vergl. weiterhin). Sollen jedoch von zwei verschiedenen Körpern die Schwingungen zu einander parallel oder rechtwinklig combinirt werden, so bedient man sich eigener Apparate, welche im Folgenden besprochen werden.

36. Apparat (Vibrograph) für die Combination zweier paralleler Schwingungsbewegungen, welche in zwei verschiedenen Körpern erfolgen. Derselbe ist in Fig. 18 dargestellt[6]). Er besteht im wesentlichen aus einer Stimmgabel *A* (Fig. 18 und 19), welche fix bleibt und welche eine angerußte Schreibplatte (einen Glas- oder Papierstreifen) längs der einen Zinke an der oberen Seite trägt und aus einer Stimmgabel *B*, die am freien Ende der einen Zinke ein Schreibstielchen *b* zeigt und sich auf einer zur Scheibenfläche *a* parallelen Schiene bewegen lässt. — Nachdem man das Schreibfederchen der Gabel *B* in zweckmäßiger Weise (§. 34) auf die Schreibfläche oder auf den Glasstreifen der Gabel *A* gerichtet hat, werden beide Stimmgabeln durch kräftiges Streichen mittelst eines Contrebass-Bogens oder durch Anschlagen mit einem Tampon zum Tönen angeregt. Gleich darauf beginnt die pa-

Fig. 18.

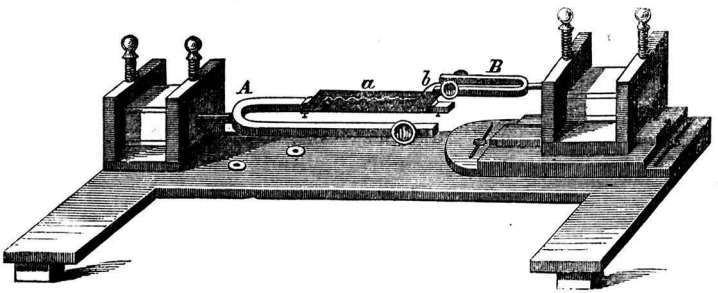
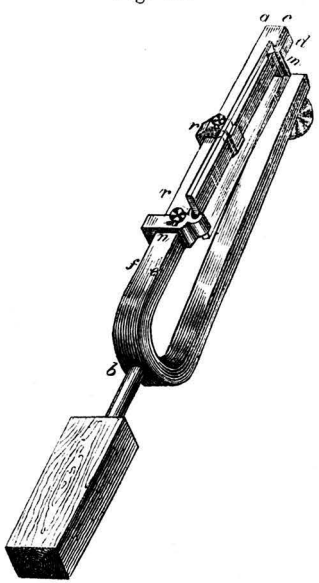


Fig. 19.



rallele Verschiebung der Gabel B, wobei die entsprechende Tonschrift auf der Glas- oder Papierfläche erscheint.

37. Apparat (Vibrograph) für die Combination zweier zu einander senkrechten Schwingungsbewegungen, welche in zwei verschiedenen Körpern erfolgen. Dieses Instrument (Fig. 20) stellt man aus den beim vorigen Apparat angewendeten Stimmgabeln auf demselben Fußbrett zusammen. Die fixe Stimmgabel

Fig. 20.

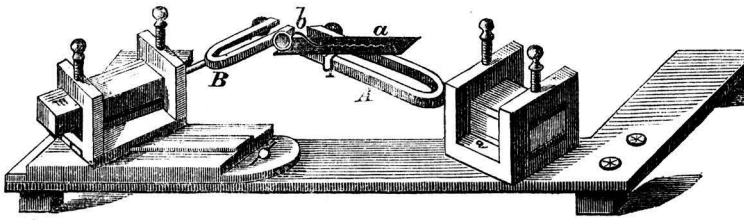
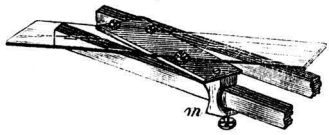


Fig. 21.



A (Fig. 20 und 21) wird nämlich von ihrem für die parallele Combination bestimmten Ort abgeschraubt und an einer zweiten für die rechtwinklige Combination berechneten Stelle befestigt. Das Übrige ist durch die Zeichnung von selbst klar, wenn man erwägt, dass die bewegliche Gabel längs einer erhabenen, hölzernen Schiene vermöge einer Nut lauft, welche an der Sohle ihres hölzernen Trägers eingeschnitten ist.

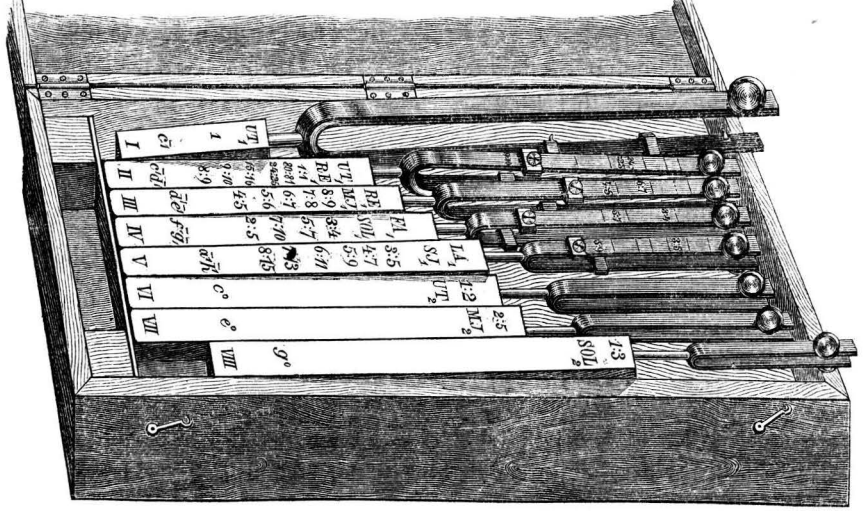
38. Bemerkungen zu den Combinations-Vibrographen. a) Die schreibende Lamelle muss stets parallel zur Längenrichtung der Schreibfläche, d. i. des Glas- oder Papierstreifens liegen, mithin in (Fig. 18) parallel zur Axe der schwingenden Zinke *A*; in (Fig. 20) aber senkrecht zu dieser Axe.

b) Um die schreibende Gabel genau auf die fixe richten zu können, lässt sich das Fußbrett der Gabel *B* lateral verschieben und dann festmachen. Zur Regulierung der gegenseitigen Höhe der Gabeln dienen verschieden hohe Holzklötzchen. Jede der Stimmgabeln ist behufs der optisch-akustischen Studien nach Lissajous (Capitel IV) an einer der Zinken

oben mit einem runden nach außen gerichteten Metall- oder Glasspiegel und an der andern Zinke, an der gleichliegenden Stelle, mit einem gleich geformten Gegengewichte versehen. Man muss mit Hilfe der Klötzchen die schreibende Gabel in ihrem Träger so hoch über die fixe Gabel anbringen, dass weder ihr Spiegel noch das Gegengewicht die Glasplatte berühren kann.

c) Die tiefste mit ut_1 d. i. mit unserem C oder c^{-1} (vergl. pag. 9, Anmerk. 1) bezeichnete Stimmgabel ist zum Tragen der Schreibfläche bestimmt. Zum Einspannen derselben für die parallele Combination ist sie mit zwei eigenen, aus Fig. 19 ersichtlichen Haltschienen versehen, wovon die am oberen Ende der Zinke befindliche fix ist. — Zum Festmachen des Glasstreifens für die senkrechte Combination dient ein eigener kleiner Hälter (Fig. 21). — Die Änderung in der Stimmung der größten Gabel, welche durch Hinzugabe des Glasstreifens bewirkt wurde, wird durch Verschiebung eines Gegengewichtes ausgeglichen.

Fig. 22.



d) König gibt seinem Apparate gewöhnlich (Fig. 22) sieben zum Schreiben bestimmte Gabeln bei, von welchen Nr. II bis V durch Verschiebung von Gewichtchen bis zu

einer radierten Marke verschieden gestimmt werden können. (Vergl. pag. 25.) Mit den acht Gabeln (die fixe eingerechnet) kann man alle Intervalle der Tonleiter erhalten und die gewünschten Combinationen schriftlich zur Anschauung bringen. — Es genügt vollständig, die eine Gabel fix und die übrigen zum Schreiben einzurichten und es wäre überflüssig, den Apparat so zu verfertigen, dass jede der Gabeln nach Belieben Platten- oder Federträgerin wäre.

e) Die Führung der schreibenden Gabeln geschieht gleichförmig mit der Hand. Es wäre übrigens leicht, diese Bewegung durch ein fallendes Gewicht in Verbindung mit ausgleichenden Windflügeln bewirken zu lassen.

Ebenso könnte man die beiden Gabeln ihre Stellung vom Nullwinkel bis zum Rechten stetig ändern lassen und Schriftproben abnehmen. Dadurch würde aber der Apparat jedenfalls an Einfachheit einbüßen, aber freilich wieder an Universalität gewinnen.

39. Näheres über die König'schen Stimmgabeln. *a)* Die König'schen Stimmgabeln tragen auf der einen Seite des Bogens das Tonzeichen sammt der zugehörigen Zahl der halben Schwingungen, und auf der anderen Seite das Zeichen *R. K.* Der parallelopipedische hölzerne Stiel derselben enthält nochmals schwarz eingeprägt die Tonbenennung sammt der relativen Schwingungszahl. Die in messingenen übergreifenden Ringen gefassten Lissajouschen Spiegel (Cap. IV) sind angeschraubt, und ihr Einfluss ist an der zweiten Zinke durch eine angeschraubte, kreisförmige Messingscheibe aufgehoben.

b) Die zum Tragen der Glasplatte bestimmte Gabel (Fig. 19) ist behufs der parallelen Combination mit zwei breiten, messingenen Haken versorgt, welche an der inneren, concaven Seite feilartig mit „Hieben“ versehen sind, um durch diese künstliche Aufrauhung einen besseren Halt für die Glasplatte zu bewirken. Der obere Haken ist festgestellt, während der untere sich nach der Länge der einzuschiebenden Glasplatte passend verrücken und dann mit einer Schraube festmachen lässt. Ein messingener Reifen *r* dient zur Her-

stellung des richtigen Tones, indem er an der Zinke so lange bewegt wird, bis der gesuchte Ton sich vernehmen lässt; alsbald wird der Schubreifen an der zuletzt gefundenen Stelle mittelst einer Schraube fixiert.

Der Ton wird um so höher, je mehr man das Schubgewicht gegen den Bogen der Stimmgabel rückt (pag. 25). Auch bei der senkrechten Combination (Fig. 20) braucht man den Ring *r* (Fig. 19) zumRegulieren des Tones. Die Gabel I ist für den Ton $ut_1 = C = c^{-1}$ mit 128 halben oder 64 ganzen Schwingungen bestimmt.

c) Die Gabel Nr. II ist für die Tonverhältnisse 1 : 1, 80 : 81, 24 : 25, 15 : 16, 9 : 10 und 8 : 9 bestimmt.

Diese Verhältniszahlen sind sowol auf dem Stiele als auch auf der Gabel selbst angebracht und zwar auf letzterer bei einem Querstriche, bis zu welchem an jeder Zinke ein Laufgewichtchen verschoben werden muss (pag. 25), um mit der tönenden Gabel Nr. I das entsprechende Tonverhältnis zu erhalten.

Die Laufgewichtchen am obersten Strich bewirken den Ton $ut_1 = C = c^{-1}$, am untersten Strich aber den Ton $re_1 = D = d^{-1}$.

In ähnlicher Weise verhält es sich auch mit den Zeichen auf den anderen Stimmgabeln.

d) Die Gabel Nr. III gibt je nach der obersten oder untersten Stellung der beiden Schieber an je einer der Zinken den Ton, $re_1 = D = d^{-1}$ oder $mi_1 = E = e^{-1}$ und mit Nr. I combinirt die Verhältnisse 8 : 9; 7 : 8, 6 : 7, 5 : 6 und 4 : 5.

e) Gabel Nr. IV gibt für die oberste Stellung der Schieber $fa_1 = F = f^{-1}$, für die unterste $sol_1 = G = g^{-1}$ und mit Nr. I..... 3 : 4, 5 : 7, 7 : 10 und 2 : 5.

f) Gabel Nr. V ist für 3 : 5 ($la_1 = A = a^{-1}$); 4 : 7, 5 : 9; 6 : 11; 7 : 13 und 8 : 15 ($si_1 = H = h^{-1}$) bestimmt.

g) Gabel Nr. VI gibt den Ton $ut_2 = c = c^0$ und also mit Nr. I das Tonverhältnis 1 : 2. Diese und die nachfolgenden Gabeln haben keine Stimmschieber.

h) Gabel Nr. VII ist für den Ton $mi_2 = e = e^0$ und mit Rücksicht auf die Gabel Nr. I das Tonverhältnis 2 : 5 gestimmt.

i) Gabel Nr. VIII mit dem Ton $sol_2 = g = g^0$ und dem Intervall 1 : 3 bezüglich der Gabel Nr. I.

Dimensionen der König'schen Gabeln in Centimetern (Fig. 19 und 22).

Nr. der Gabel	Länge *a b* der Gabel	Breite *c d* der Gabel	Dicke *e f* der Gabel	Durchmesser des Spiegels an der Gabel
I.	35cm	1·775cm	1cm	2·85cm
II.	26cm	1·2cm	0·675cm	2·85cm
III.	24cm	1·2cm	0·65cm	2·85cm
IV.	23cm	1·2cm	0·65cm	2·85cm
V.	22cm	1·2cm	0·65cm	2·85cm
VI.	20cm	1·2cm	0·65cm	2·85cm
VII.	17·4cm	1·2cm	0·65cm	2·85cm
VIII.	16cm	1·2cm	0·65cm	2·85cm

40. Anwendung der Vibrographie zum Studium verschiedener physikalischer Fragen, von Laborde. a) Vibrograph nach Laborde[7]). Man denke sich an zwei parallelen Fäden einen schweren geraden Stab, welcher eine berußte Glasscheibe oder einen berußten Papierstreifen trägt. Das Ganze stellt ein Pendel vor, mit unveränderlicher Schwingungsebene. Fixiert man dasselbe außerhalb seiner Ruhelage und bringt die schreibende Lamelle in jene Lage, wie dies bei den bereits besprochenen Vibrographen der Fall ist, so wird nach dem Auslösen des Pendels und nach einem Hin- oder Hergange eine Tonschrift auf der Schreibfläche erscheinen. Um eine zweite und dritte Zeile zu bekommen, hält man nach je einem Hin- oder Hergange das Pendel auf; schraubt die Glasplatte, je nach der ursprünglichen Lage des Schreibstiftchens, etwas tiefer oder höher, um der schreibenden Spitze eine neue unbeschriebene Gerade zu bieten, und verfährt wie vorher.

Beim Apparate von Laborde war der Träger der Schreibfläche ein schwerer Holzblock, der an der vorderen zur Schwingungsebene parallelen Seite gut planiert war. An dieser Fläche wurde durch Federchen die Glasplatte angedrückt. Der Plattenträger selbst verband zwei hölzerne Lineale, welche $2^1/_2{}^m$ lang waren, und welche 2^m von einander entfernt an je einem Faden, von der Zimmerdecke herabhingen, so dass diese Lineale die Träger des Hälters für die Schreibfläche waren und dem Ganzen die nothwendige, in einer Ebene liegende Bahn sicherten.

b) Laborde ließ einen galvanischen Strom von einem eingeschalteten, schwingenden tönenden Metallstab unterbrechen. In einiger Entfernung davon war ein Elektromagnet eingeschaltet, dem das eine Ende eines Eisenstabes zum Anziehen geboten war, welcher ebenso hoch wie jener Unterbrecher gestimmt war. Laborde's Vibrograph zeigte beide Tonschriften ganz gleich, so dass der angezogene gleichgestimmte Eisenstab genau die Bewegung des Unterbrechers wiederholt.

1. Es ist von selbst klar, dass bei diesem Versuche zwei Laborde'sche Vorrichtungen nothwendig waren, oder dass bei einem einzigen Apparat die Entfernungen durch gut isolierte Drahtwindungen hergestellt wurden.

2. Die Unterbrechung des Stromes vom ursprünglich schwingenden Metallstab wird dadurch bewirkt, dass dieser mit einer Eisenspitze nahe dem Quecksilber eines metallischen Näpfchens liegt. Sobald diese Spitze mit dem Quecksilber in Berührung gebracht wird, beginnt das Spiel (vergl. Fig. 6 bei *c*).

3. Ich glaube, dass ein derartiger Unterbrecher sammt zugehörigem Elektromagnet und Eisenstab dazu dienen könnte, hörbare stehende Längenschwingungen der Luft in beiderseits, also gänzlich geschlossenen Röhren hervorzurufen, um so den theoretischen Satz experimental zu erhärten, dass sich eine völlig eingeschlossene Luftsäule wie ein beiderseits unterstützter longitudinal schwingender Stab verhält. Im Innern der Pfeife müsste, ähnlich wie beim Neef'schen Hammer, ein von einem hier befindlichen Elektromagnete bewegter Eisenstab die Luft zum Schwingen anregen. Um den vom vibrierenden Stab herrührenden Ton zu eliminieren, könnte er mit Tuch oder dergleichen überzogen sein, wodurch zugleich dem remanenten Magnetismus entgegengewirkt wäre.

c) Ein Eisenstab, der mit dem einen Ende zwischen den nahen Polen eines Elektromagnetes schwingen konnte, zeigte mittelst eines Phonogrammes schnellere Schwingungen als beim freien Vibrieren. Laborde nimmt als Ursache hievon die vorübergehende Härtung an, welche das Eisen nach Ruhmkorff beim Magnetisieren erfährt.

d) Die Schwingungen eines Neef'schen Hammers waren etwas langsamer, wenn der Nebenstrom geschlossen wurde. Die Spitzen der Berge und Thäler an der Tonschrift deuteten auf secundäre Wellen, welche aus dem magnetisierenden Einfluss des Nebenstromes herkommen mögen.

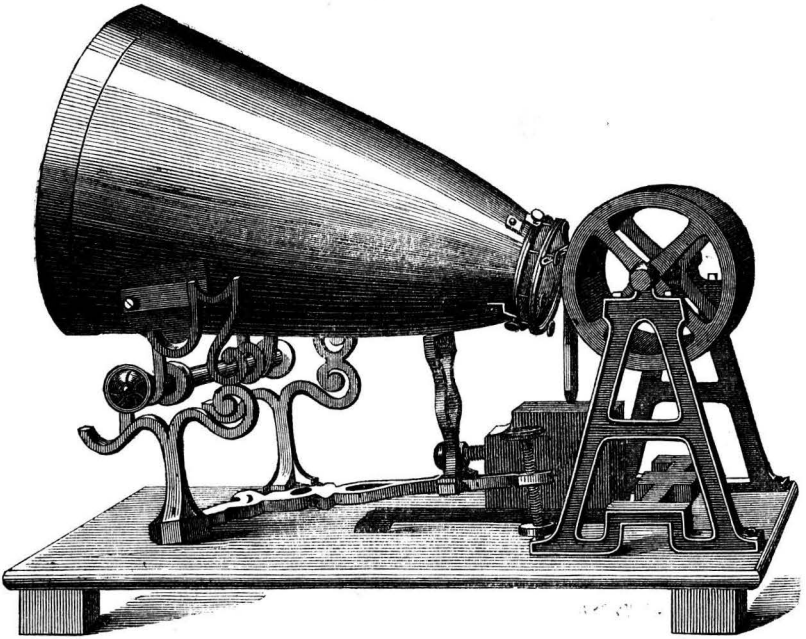
e) Der Rand einer Cymbel (eines Metall-Tellers unserer Militärmusik) wurde mit einem Schreibfederchen versehen und beim Anschlage der Cymbel eine Tonschrift gesucht — dieselbe deutete auf einen kaum hörbaren, tiefen Ton hin.

f) Es versteht sich von selbst, dass auch die von mir bereits beschriebenen Vibrographen für diese und ähnliche Studien benützt werden können. Sehr sinnreich hat Laborde die Vibrographie angewendet — um das Fallgesetz zu studieren. Ein zwischen zwei von einander entfernten Schienen fallendes Gewicht trägt eine lothrecht gestellte Schreibplatte. Zu Anfange des Versuches liegt die Spitze des Schreibfederchens an dem unteren Ende der Schreibfläche. In dem Maße als das Gewicht näher dem Boden kommt und seine Bewegung beschleunigt, werden weniger Berge und Thäler der Tonschrift auf derselben Strecke liegen. Weiß man nun, wie viel Schwingungen der tonschreibende Körper in der Secunde macht, so lässt sich selbstverständlich aus dem Phonogramm das Fallgesetz ableiten (!). Wird das Gewicht in die Höhe geschnellt, so muss sich das Gesetz der gleichförmig verzögerten Bewegung auf dem Rußе des Glases gravieren.

Zum Halten und Auslösen des Gewichtes dient ein Kniehebel. Der Apparat ist nur $^1/_2$ mètre hoch und kann als Ersatz oder besser neben der Fallmaschine beim Unterrichte dienen.

41. Membran-Phonautograph nach Scott und König a) Erregt man (Fig. 23) vor der weiten Öffnung des hohlen Paraboloides einen Ton, so theilt sich dieser zunächst der in dem Paraboloide enthaltenen Luft und dann der Membrane mit, welche am vorderen Ende im Brennpuncte des Paraboloides die kleinere Öffnung überspannt. Trägt die Membrane ein sehr biegsames leichtes Federchen, so kann dieses an einem vorgesetzten Schreibcylinder die Anzahl der Schwingungen der

Fig. 23.

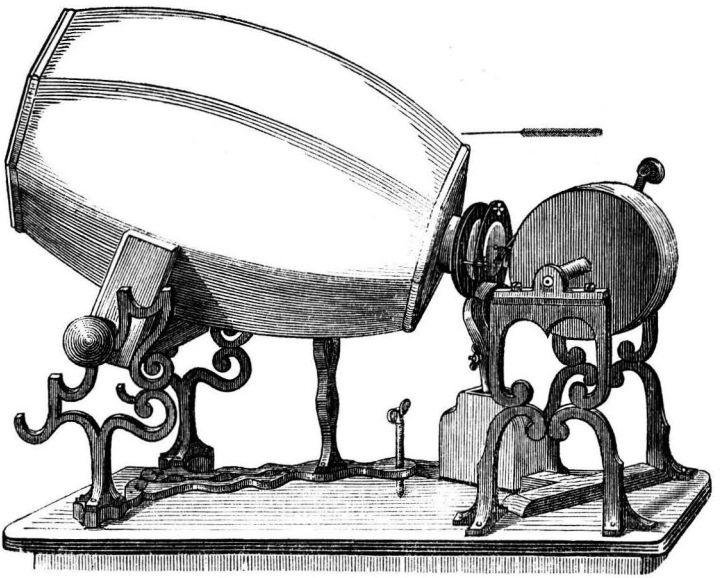


Membrane und mittelbar des ursprünglich tönenden Körpers notieren. Im Übrigen, z. B. mit der Zeitmarkierung, dem Schreibcylinder u. s. w. verhält sich alles, wie bei dem Vibrographen. Man sieht in Fig. 23 neben dem Schreibfederchen eine Zeit anmerkende Stimmgabel. (§. 33.)

b) Der erste von Scott[8]) ausgeführte Phonautograph war (Fig. 24) ein hohles Ellipsoid aus starken Gipswänden. In den einen Brennpunct wurde der tönende Körper gestellt, im anderen Phocus war die Membrane angebracht. König in Paris gab dem Apparate die zweckmäßigere paraboloidische Gestalt, verfertigte ihn aus Zink und fügte außerdem noch manche Verbesserung hinzu.

„Phonautograph" oder „Phonograph" ist die allgemeinste Bezeichnung für jede Vorrichtung, welche die Schwingungen eines tönenden Körpers anmerkt (§. 30). Sein Synonym ist „Vibroautograph" oder „Vibrograph" und eigentlich sollte zwischen diesen Ausdrücken kein Unterschied gemacht werden. Die verschiedenen Arten der Phon- oder Vibroautographen wären durch Beisetzung der Namen der Erfinder oder durch ein wesentliches Merk-

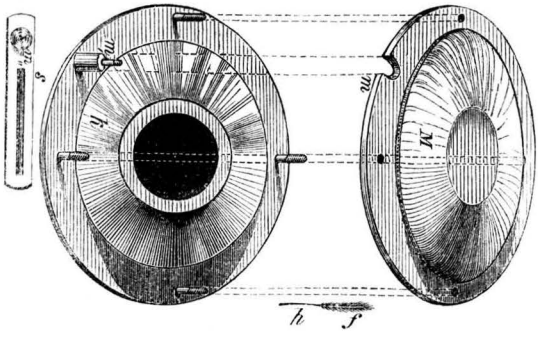
Fig. 24.



mal zu unterscheiden. So könnte z. B. der Scott'sche Apparat, weil er eine vielseitige Verwendung gestattet, mit Universal- auch „Pan-Phonauto- oder nach seinem wesentlichsten Bestandtheil, mit „Membran-Phonautograph" bezeichnet, und in dieser Weise von den übrigen ähnlichen Instrumenten unterschieden werden. Indes scheint es bei den Verfertigern akustischer Instrumente üblich, das Wort „Phonautograph (Phonograph) im engeren Sinne zu nehmen, und auf den Scott'schen Apparat ausschließlich zu beziehen, während „Vibroskop" für den Apparat nach Duhamel oder König (§. 31 und 32) gebraucht wird. Die übrigen Instrumente werden meistens mit „Apparat" und einem beschreibenden Zusatze gegeben.

42. *Bemerkungen zum Membran-Phonautographen. a)* Der wichtigste Theil des Pan-Phonautographen ist die Membrane Dabei achte man vorzüglich auf die Art, sie zu spannen und zu dirigieren. Als Membrane können hier dienen: Die sehr feinen Blasen und Membranen der Herzbeutel von kleineren Thieren, wie z. B. von Kaninchen, Hausenblase, Goldschlägerhäutchen, Pflanzenpapier, feines nicht gerifftes Briefpapier, Papier ohne Ende, sehr feines Pergamentpapier, Collodium u. dgl. m.. Je zarter das Häutchen, desto empfindlicher wird der Apparat

Fig. 25.



Die Membrane spannt man (Fig. 25) über einen Ring und legt sie dann auf die kleinere Mündung eines abgestutzten kleinen hohlen messingenen Paraboloides. Darauf kommt nun ein Messingreifen, der durch 4 um einen Viertelkreis von einander abstehende Schrauben mit einem um die Basis dieses kleinen Paraboloides liegende messingene Reifen verbunden wird.

Durch Anziehen oder Nachlassen der Schrauben spannt man die Membrane mehr oder weniger. Der untere Reifen dieses kleinen Paraboloides wird (Fig. 23) am abgestutzten Ende des großen Paraboloides derart festgemacht, dass vier an letzterem befindliche Schrauben in die Nut eingreifen, welche der untere Reif des Membranenträgers an seinem Mantel besitzt. Wenn die vier Schrauben gelüftet werden, welche den Membranenhälter befestigen, so kann man letzteren um seine Axe drehen.

Beim ursprünglichen Apparat von Scott (Fig. 24) war der in eine Röhre auslaufende Membranenträger in einer weiteren kurzen Röhre am vorderen Ende des Ellipsoides verschieb- und drehbar eingebracht. Die Membrane war in schiefer Lage befestigt, was als nicht nothwendig von König beseitigt wurde.

b) Zum Schreiben verwendet man ein sehr kleines, elastisch steifes und biegsames Vogelfederchen (Schwanenfederchen), welchem eine Schweinsborste, an die es geleimt wurde, als Träger dient. Die Schweinsborste klebt man mittelst eines sehr kleinen Stückchens Pickwachses an die Membrane so, dass das Federchen schief nach oben schaut und sich sanft an die Oberfläche des Schreibcylinders etwas nachschleifend

anlegt. Dabei muß es mit der Drehaxe des Schreibcylinders einen schiefen Winkel bilden. Es bedarf hier stets einiger Geduld, bis man das Rechte versuchsweise trifft.

Zuweilen gewinnt man die beste Stellung, indem die ganze Membrane etwas gedreht wird, ohne das Schreibstiftchen weiter zu berühren oder indem man die Knotenlinien an der Membrane mittelst Verschiebung des aus der Fig. 23 ersichtlichen, vor der Membrane querliegenden Streifens wechselt.

c) Der Träger des Apparates gestattet diesem eine wechselnde, zweckmäßige Lage zu geben. — An der Berührungsstelle mit dem Paraboloid und wo es sonst noch nothwendig erscheint, sorge man für weiche, schallisolierende Zwischenlagen.

Dimensionen zum König'schen Membran-Phonautographen:

Durchmesser des Membranenträgers	10·2cm,
Längenaxe des Paraboloides	51·5cm,
Äußere Länge des Paraboloides	53·5cm,
Durchmesser der vorderen kleinen Öffnung am Paraboloide	6·2cm,
Durchmesser der hinteren größeren Öffnung am Paraboloide	35·6cm,
Durchmesser des Schreibcylinders	17·8cm,
Länge des Schreibcylinders	24·0cm.

d) Eine Membrane, welche über die weite Öffnung eines Trichters einer abgesprengten Fläche, über eine abgestutzte Hohlkugel u. dgl. m. gespannt wird, kann dazu dienen, den Grundgedanken der Scott'schen Phonautographen zu verwirklichen. Zu ernsten Studien ist jedoch ein sorgfältig construierter Apparat nothwendig.

43. Akustische Eigenschaften der Membranen. a) Bevor wir die Leistungen des Pan-Phonautographen besprechen, müssen wir über die akustischen Eigenschaften seines Hauptbestandtheiles, d. i. der Membrane, in's Klare kommen. Nach Savart[9]) glaubte man, dass eine gespannte Membrane mit jedem über ihrem Grundton liegenden Ton im vollkommensten Einklange mitschwinge. Dieser Satz stand mit den theoretischen Untersuchungen von Poisson[10]) und Lamé[11]) im Widerspruch, nach welchen die Membranen wie die Saiten nur bei bestimmten Tönen in Mitschwingung gerathen sollten. Bei einem jeden

Ton soll, nach der Theorie an der Membrane nur ein gewisses System von Klangfiguren entstehen, welche in einander übergehen können. Ein stetiges Fortschreiten aus dem einen System von Klangfiguren zu dem eines andern Tones wäre jedoch unmöglich. Die Wahrheit dessen haben Bourget und Bernard[12]) neuestens nach einem dreijährigen experimentalen Studium bewiesen. Wenn man eine Melodie singen lässt, während eine gespannte Membrane vor ein Ohr gehalten wird, so hört man die Membrane nur zuweilen tönen, und nicht selten mit einem anderen Tone, als die der Stimme, und doch sollte nach Savart die Membrane ein treues Schallbild des Gesanges geben. Ebenso waren folgende zwei Versuche gegen den Savart'schen Satz:

1. Eine Lippenpfeife von dem Grundtone, welchen die Membrane beim Anschlagen mit einem kleinen Korkklöppel gibt, bringt den Sand auf der Membrane in heftige Bewegung. Verlängert man die Pfeife durch Ansetzen eines Rohres aus starkem Papier, so hört die Bewegung des Sandes an der Membrane auf. Dieselbe tritt jedoch wieder ein, wenn man sich nach stetiger Verkürzung des Pfeifenrohres dem Grundtone nähert.

2. Stimmt man die Pfeife etwa um eine Terz höher als die Membrane, erwärmt die letztere, bis sie einen höheren Ton als die Pfeife gibt, und hält sie über das tönende Pfeifenrohr, so bleibt die Membrane anfänglich in Ruhe; aber wie sie erkaltet, ihre Spannung nachlässt und ihre Stimmung dem Tone der Pfeife nahe kommt, fängt sie zu schwingen an, um bei weiterer Erkaltung bald wieder zur Ruhe zu kommen.

Ein Unterschied zwischen diesen Versuchen und der Theorie stellte sich aber dennoch heraus. Die Membranen gerathen nämlich nicht bloß in Schwingungen, wenn ihr Grundton dem anregenden Tone genau gleich ist, sondern schon bei einem Unterschiede von etwa $^1/_2$ Tone ober oder unter dem Grundtone, obwol auf beiden Seiten mit geringerer Stärke, als bei dem vollkommenen Einklange. Die Grenzen der Membrane sind also (nach Bourget und Bernard) etwas weiter, als

die der starren Körper, sind aber in sehr beachtenswerther Weise vorhanden.

b) Trotz dieser vorzüglichen Arbeiten von Bourget und Bernard über die Membrane bleibt hier noch Vieles zu erforschen und aufzuklären, besonders wenn man die älteren, jedoch ebenfalls gründlichen Studien von Marx [13]) mit jenen von Bourget und Bernard vergleicht und ferner, wenn man die Resultate, welche der Phonautograph je nach den verschiedenen Experimentatoren und bei dem Telephon von Reis (§. 49) liefert, gegen einander hält. König, der ein Anhänger der Bourget-Bernard'schen Theorie ist, war bisher der Ansicht, der Membranen-Phonautograph könne zur Bestimmung der Höhe eines Tones dienen, der aus einer beliebigen Tonquelle vor der weiten Öffnung des Paraboloides erschallt, sowie auch zur Anfertigung von Tonschriften für einfach combinierte Töne innerhalb einer Octave, jedoch sei schon das letztere sehr schwierig zu bewirken und große Vorsicht dabei nothwendig. Mit Rücksicht auf die Resultate anderer Forscher und besonders von Marx habe ich vor zwei Jahren (1862) anderen Ortes [14]) ausgesprochen, der Membran-Phonautograph dürfte sowol die Anregung als auch die Mittel abgeben zum weiteren, eindringlichen Studium des Verhaltens der Membranen als tönender Körper. Und in der That hat neuestens (1864) F. C. Donders [15]) mit Hilfe des Membran-Phonautographen Studien gemacht, welche zeigen, dass mittelst kleiner Abänderungen, besonders des schreibenden Federchens Curven erhalten werden können, welche für die Farbe verschiedener Instrumenten-Klänge und Vocale und sogar für die Übergänge zu den Consonanten charakteristisch seien. Donders hat zwar die Bilder dieser Curven noch nicht veröffentlicht, wir werden aber seine Angaben darüber weiterhin im wesentlichen wiederholen.

44. König's Versuche mit dem Membran-Phonautographen. *a*) Wie schon erwähnt, ging König (1862) von den Bernard-Bourget'schen Versuchen bezüglich der Membranen aus. Nach diesen war zu folgern, dass die Erwartung des Erfinders Scott [16]),

sein Instrument werde unterscheidende Autogramme von Worten geben, unerfüllt bleiben müsste.

Ferner würde sich nach den Bernard-Bourget'schen Studien zeigen, dass auch die Klangfarbe (Klangeigenthümlichkeit) mit dem Membran-Instrumente nicht abgebildet werden könne, die Stärke des Tones nur bedingungsweise, und dass selbst bei der schriftlichen Wiedergabe der Höhe des Tones bezüglich der Feststellung der Schwingungszahl Vorsicht nothwendig sei.

Um zunächst Gewissheit zu erhalten, ob das auf der Membrane eines Phonautographen befestigte Stielchen wirklich alle Schwingungen wieder gibt, welche vor der Öffnung des Paraboloides erregt werden, machte König nach dem Vorgehen von Lissajons folgenden Versuch. Er ließ eine Stimmgabel vor der weiten Öffnung des Phonautographen schwingen und ihre Schwingungen an dem Schreibcylinder markieren. Neben diesem Phonautogramm zeichnete aber eine mit der ersten Gabel vollkommen gleich gestimmte Gabel ihre Vibrationen auf. Die Schwingungszahlen beider Tonschriften ergaben sich für dieselbe Zeit als vollkommen gleich. Bourget und Bernard haben jedoch gefunden, dass die Membranen nicht selten einen der harmonischen Obertöne des von ihnen erregten Klanges statt des Grundtones geben. König beschränkt diese Fälle auf verhältnismäßig grosse Membrane, deren Grundton viel tiefer ist, als der Grundton des die Membrane anregenden Klanges. Bei Membranen von 4—5 Centimeter Durchmesser, wie sie König an seinen Phonautographen anwendet, wird sich dieser Fall höchst selten ereignen, und wenn er eintritt, kann er den Beobachter nicht irre führen; denn es wird dann wol nur einer der ersten Obertöne des erregenden Klanges angemerkt worden sein. Bei diesen ist aber die Distanz von dem Grundton des erregenden Klanges noch so groß, dass der Unterschied zwischen der erhaltenen und erwarteten Zahl in die Augen springen muss. Bei gehöriger Vorsicht wird also der Phonautograph die Höhe des Grundtones im erregenden Klang stets anzugeben vermögen.

b) Damit das Federchen des Phonautographen schreiben könne, muss es einen Sitz an einem Bauche der schwingenden

Membrane und nicht in einer Knotenlinie haben, ferner muss es sich in einer zur Axe des Schreibcylinders parallelen Richtung bewegen. Da nun die Knotenlinien sowohl, als auch die Schwingungsrichtungen in der Membrane für verschiedene Töne andere sind, so sieht man leicht, dass für ungleiche Töne der Ort des Federchens an der Membrane selbst und die Lage der Membrane gegen den Schreibcylinder gewechselt werden müssen. Das letztere erlangt man durch Drehung der Membrane, welche die Einrichtung des Apparates sehr leicht gestattet. Die Änderung der Lage der Knotenpuncte ohne das Schreibfederchen zu versetzen, wird mittelst einer Schraube bewirkt, welche man an verschiedenen Puncten der Membrane anlegen kann, und die behufs dessen von einer längeren, um einen fixen Punct dreh- und verstellbaren Messingleiste *s* (Fig. 25) getragen wird.

c) Die Membranen schwingen nur bei bestimmten Tönen mit. Nun kann eine Membrane mit einem schwachen Tone vollkommen gleich gestimmt sein, während sie mit einem anderen kräftigen Tone in einem so entfernten Verhältnisse steht, dass schon bei einer geringen Änderung in der Stimmung des einen beider Theile jedes Mitschwingen aufhört. (Vergl. *a* dieser Nummer.) Im ersten Falle wird dann die Tonschrift weite Excursionen, im zweiten schmale zeigen — und doch war es mit den Tonstärken umgekehrt! — Es ereignet sich ferner oft, dass ein gesungener Ton eine Wellenlinie anmerkt, welche jener gleich ist, die bei der Combination von zwei gleich starken Tönen auftritt, die im Verhältnis der Octave (1 : 2) oder, obschon selten, der Quinte der Octave (1 : 3) gegen einander stehen. Dies ist dann der Fall, wenn die Membrane eine solche Spannung oder Stimmung hat, welche die Hervorrufung des harmonischen Obertones mehr begünstigt, als die des Grundtons, wo dann (obschon beide Töne gleich kräftig gezeichnet erscheinen) der erste Ton verhältnismäßig stärker, der zweite verhältnismäßig schwächer im Rußе radiert wurde, was sogleich einleuchtet,

wenn man bedenkt, dass der harmonische Ton im Vergleich mit dem Grundton meistens so schwach klingt, dass er erst mittelst eines Resonators von Helmholtz (vgl. §. 5) deutlich wahrgenommen werden kann — und dennoch zeigt er hier die gleiche Stärke, wie der lautklingende Grundton! Man sieht demnach, dass der Phonautograph mit Membrane von der Stärke der Töne kein verlässliches Bild zu geben vermag.

d) Noch weniger kann er dieses von der Klangfarbe. Diese hängt bei den musikalisch tauglichen Tönen bekanntlich von der Anzahl und Stärke der harmonischen Obertöne (der Partial- oder Theiltöne) ab, welche den Grundton begleiten (§. 16). Die Membrane müsste also, wenn sie die Klangfarbe zu zeichnen gestatten sollte, mit jedem der Partialtöne vollkommen mitschwingen, und zwar bei allen nach derselben Richtung und mit einer jedem Partialtone proportionalen Stärke — was sie nach dem Vorgetragenen nicht kann.

e) Wenn der Phonautograph die Klangfarbe nicht wiederzugeben vermag, so versteht es sich von selbst, dass er noch weniger im Stande ist, eine Melodie, Worte, Geräusche etc., d. i. complicierte Combinationen von regelmäßigen oder gesetzlosen Klängen abzubilden. Aber selbst, wenn dies möglich wäre, und wenn die an der Schreibfläche erscheinenden Curven auch vielmal größer wären, als sie gewöhnlich sind, ließen sich die so vielen und mannigfachen Details dennoch äußerst schwierig oder gar nicht erkennen, enträthseln oder lesen.

f) Im Allgemeinen kann (nach König's Versuchen) der Membran-Phonautograph von einem zusammengesetzten Ton oder von einer Melodie kein Bild geben. In einzelnen, in der Regel künstlich herbeigeführten Fällen ist dieses jedoch möglich. Wenn nämlich die Membrane bei gleichbleibender Spannung und derselben Stellung des Schreibfederchens von verschiedenen einzelnen Tönen deutliche Schriften gibt, dann wird sie es auch von der Combination dieser Töne. Will man von einer Combination von zwei oder drei Tönen oder von einer sehr einfachen Melodie eine Tonschrift bekommen, so

muss man zuerst jeden Ton einzeln vor der weiten Öffnung des Phonautographen erschallen lassen, das Verhalten der Membrane dabei prüfen, und durch Änderung des Ortes für das Schreibfederchen, oder durch Änderung der Lage der Knotenlinien (vergl. *b* dieser Nummer) günstigere Bedingungen aufsuchen. Bei der Combination aus wenigen Tönen kann es dann gelingen, ein Bild der Combination zusammen zu bringen. Von Stimmgabeln, welche wie in Fig. 62 oder unter beliebigem Winkel combinirt sind, erhält man mittelst des Membran-Phonautographen ein richtiges Tonbild, wenn für jeden einzelnen Ton der Gabeln die Membrane früher geprüft und gerichtet wurde.

In solcher Weise hat König in Paris fehlerlose Tonschriften von einer Melodie im Umfange einer Octave sammt Doppeltönen und Accorden erhalten. Nach König rücken die harmonischen Töne der Membranen einander sehr nahe, sobald man über die ersten hinausgeht.

45. Versuche über die Klangfarbe mittelst des Membranen-Phonautographen von F. C. Donders. *a*) Wie schon vorher erwähnt wurde (§. 43, *b*), hat es Donders dahin gebracht, auch charakteristische Tonbilder von Klangfarben zu erzeugen. Die Bedingungen für das Gelingen dieser Versuche sind nach Donders:

1) Die Membrane muss so gespannt und mit Gewichten beschwert sein, dass sie gleichzeitig von den Schwingungen sehr verschieden hoher, einfacher Töne, d. i. der Obertöne, zum gleichartigen Mitschwingen gebracht werden könne.

2) Das Schreibfederchen muss in einer zur Axe des Cylinders senkrecht stehenden Ebene liegen, es muss in einer wagrechten Ebene vibrieren, darf aber in dieser Ebene nicht biegsam sein. Als Schreibstiel dient ein zugespitzter, in der Verticalebene gebogener Span einer Federspule. Die Spitze des Schreibstieles muss an den Cylinder angedrückt werden. Er wird beiläufig im Centrum der Membrane angeklebt. Das richtige Verhältnis hiefür ist getroffen, wenn ein einfacher Ton eine einfache Sinus-Curve als Schrift liefert.

b) Donders erhielt in dieser Weise folgendes Ergebnis:

1) Unter gleichen Umständen (bei gleicher Spannung und bei demselben Federchen) bekommt man für denselben Klang stets dieselbe Curve. Die Lage der den Partialtönen entsprechenden Curven oder die Phasen der Einzeltöne bleiben also gegen einander stets ungeändert.

2) Verschiedenen Klangfarben entsprechen verschiedene Curven und zwar jedem bestimmten Klange seine charaktische, zusammengesetzte Curve.

3) Verschiedene Größen bezüglich der Spannung und verschiedene Federchen verändern die relative Größe der den Partialtönen entsprechenden Schwingungsweiten.

4) Jedem Vocal entspricht eine Curve; nur jene für u, ü und i ist nahezu einfach.

Die hohen Obertöne des *i* (Seite 27, *c*) werden also nicht ersichtlich. *P.*

5) Mit der Tonhöhe der Vocale ändert sich die Form der Curve. Dialect-Nuancen bewirken auch nur leichte Modificationen an der entsprechenden Tonschrift.

6) Bei Diphthongen (au, ai etc.) wird die Dauer und die Form des Überganges von einem Vocal zum anderen an der Tonschrift ersichtlich.

7) Consonanten vor dem Vocale ausgesprochen, ändern nur den Anfang der entsprechenden Tonschrift ab. Consonanten am Ende eines Vocales gesprochen, modificieren wieder nur das Ende der Tonschrift des zugehörigen Vocals.

8) Die 3 Resonanten liefern nahezu einfache Sinus-Curven. Die geringen Abweichungen sind aber für jeden der Resonanten eigenthümlich.

46. Phonautogramme. a) Aus dem bisher Vorgetragenen ergibt sich der Werth der Phonautogramme bezüglich der Bestimmung der Tonhöhe und bezüglich der Formen der Schwingungs-Curven der zusammengesetzten Klänge von selbst — vorausgesetzt, dass die letzteren aus nur wenigen einfachen Tönen bestehen. Hier folgt die Beibringung von einigen Tonschriften als Muster (Figuren 26 bis 60).

Fig. 26 zeigt die Tonschriften der gleichzeitigen Schwingungen zweier Stimmgabeln, von welchen die obere den Ton c^1 mit 256 und die untere jenen c^2 mit 512 Doppel-Vibrationen in der Zeitsecunde gegeben hat.

Fig. 26.

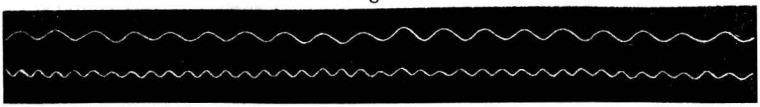
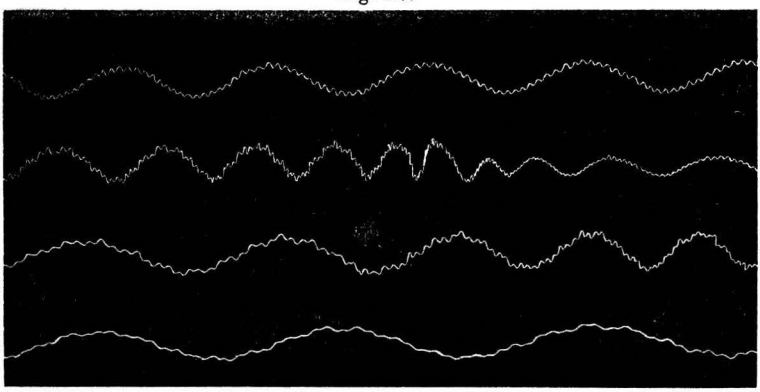


Fig. 27. zeigt das Bild von Schwingungen einer Stimmgabel, deren Grundton von einem oder zwei harmonischen Tönen begleitet ist. Die großen Wellenberge und Thäler rühren von den Schwingungen des Grundtones, die kleinen aber von den Vibrationen des harmonischen Tones her.

Fig. 27.

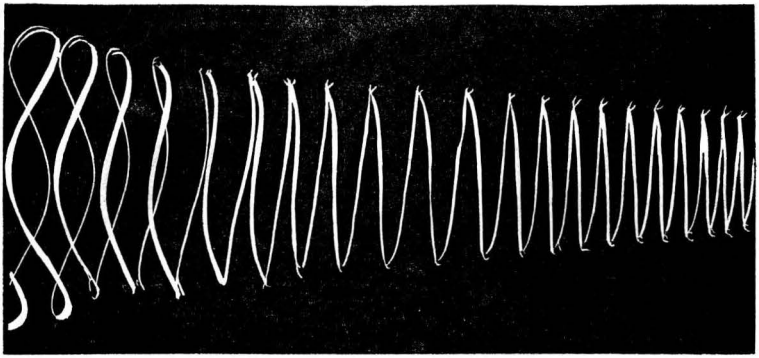


Die unterste Curve lässt eine Schrift sehen, die von einem Grundton und einem harmonischen Tone erzeugt wurde, wobei letzterer mit dem Grundton nahezu im Verhältnisse wie 1 : 21 stand. Die oberen Phonogramme stammen von einem Grundtone sammt zwei zugehörigen harmonischen Obertönen, nach den Verhältnissen wie 1 : 7 und 1 : 21.

Fig. 28. gibt eine Tonschrift der Schwingungen eines Wheatston'schen Stabes (siehe weiterhin Kaleidophon) im Verhältnisse wie 1 : 3.

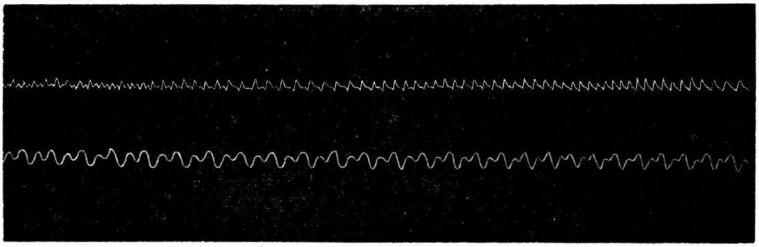
In Fig. 29. bis einschließlich 35. sieht man Phonautogramme der parallen (||) Combination von Schwingungen zweier Stimm-

Fig. 28.



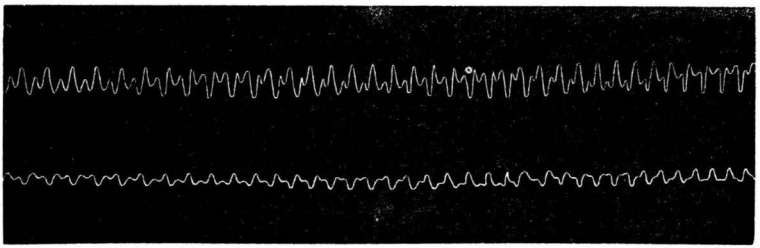
⊥
(1 : 3)

Fig. 29.



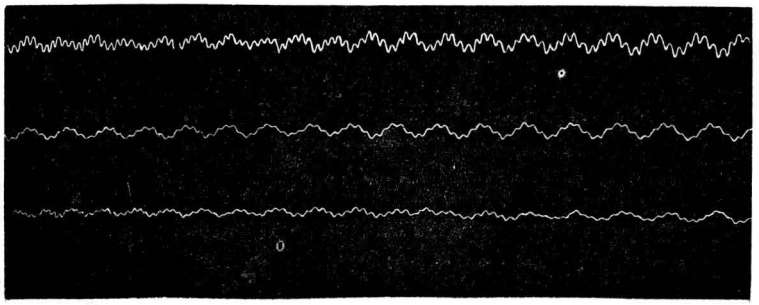
∥
(1 : 2)

Fig. 30.



∥
(1∤ : 2±)

Fig. 31.



∥
(1 : 5)

Fig. 32.

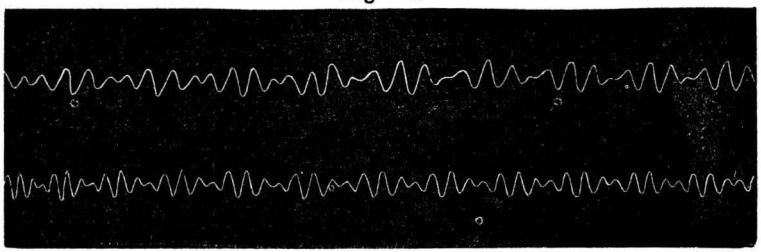


Fig. 33.

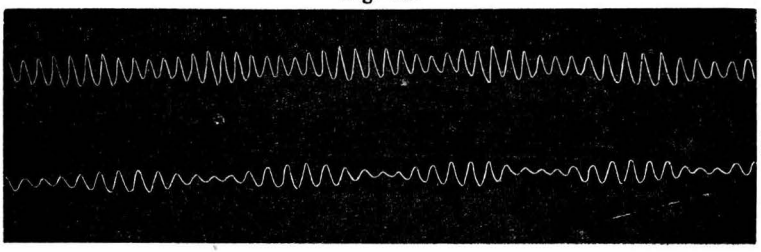


Fig. 34.

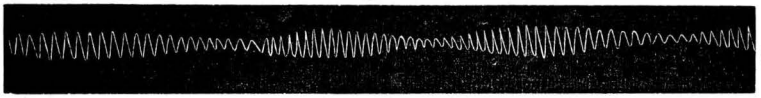
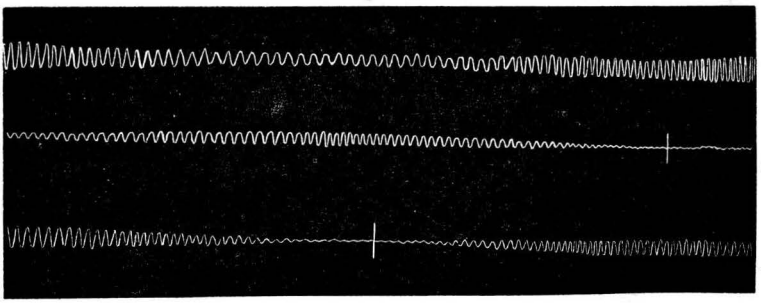


Fig. 35.



gabeln mit den Intervallen 1 : 2, 1 : 2 ±, 1 : 5, 3 : 4, 8 : 9, 24 : 25 und 80 : 81. Dieselben wurden auf berußtem Papier erzeugt, während die in den Figuren 36, 37, 38, 39 und 40 wiedergegebenen Tonschriften auf berußten Glasstreifen für die parallele (||) Combination hervorgerufen wurden. Die Tonintervalle sind seitwärts von den Tonschriften gesetzt worden.

Fig. 36. (Glas.)

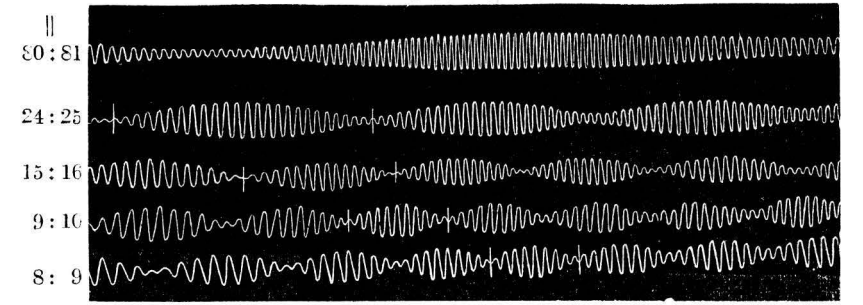


Fig. 37. (Glas.)

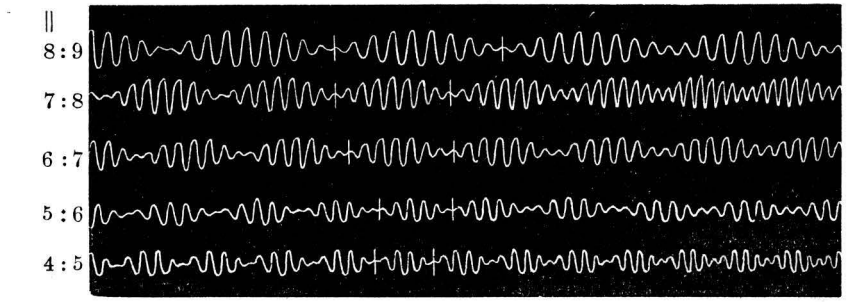


Fig. 38. (Glas.)

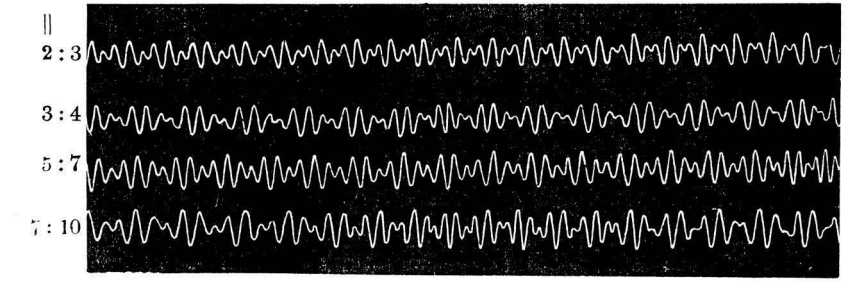


Fig. 39. (Glas.)

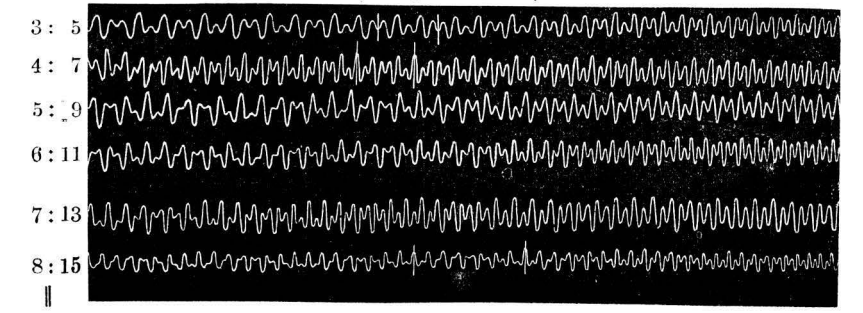
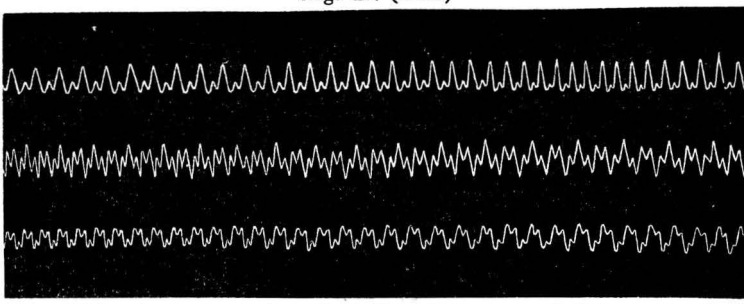


Fig. 40. (Glas.)



1) Der Apparat, mit dem diese Tonschriften angefertigt wurden, ist in Fig. 18 abgebildet.

2) Das beigesetzte Zeichen ± bedeutet hier und in der Folge einen kleinen Fehler oder eine kleine Differenz in der angegebenen Stimmung und das Phonogramm muss also das Bild von „Stößen" (vergl. Capitel II, §. 17, 18 u. s. w.) zeigen, mithin ein Abnehmen und Anwachsen in der Höhe und Tiefe der Wellenberge und Thäler.

3) Die Tonschriften in Fig. 36 wurden mit der Gabel I und II (Fig. 22), jene in Fig. 37 mit der Gabel I und III (Fig. 22) angefertigt. Überhaupt findet man leicht die entsprechenden Gabeln (Fig. 22), wenn man die dort auf dem hölzernen Stiel angemerkten und auch auf der Gabel radierten Tonverhältnisse beachtet und die Stimmschieber richtig stellt.

4) Da, wo die Ausbiegungen nicht in Folge von Stößen etwas kleiner werden, rührt dies von den in Folge der Bewegungswiderstände kleiner werdenden Vibrationen her.

5) Die schwachen Unregelmäßigkeiten haben ihre Ursache von der Ungleichheit bei der Führung der Gabel.

Fig. 41 bis incl. 45 lässt die auf Papierstreifen angefertigten Vibrogramme der rechtwinkligen (⊥) Combination der Vibrationen zweier Stimmgabeln sehen, für die Tonverhältnisse 1 : 1 ±, 1 : 2, 1 : 2 ±, 1 : 3 ± und 4 : 5. — Die auf Glasstreifen erzeugten Tonschriften für die rechtwinklige (⊥) Combination sind in den Figuren 46 und 47 wiedergegeben.

Fig. 41.

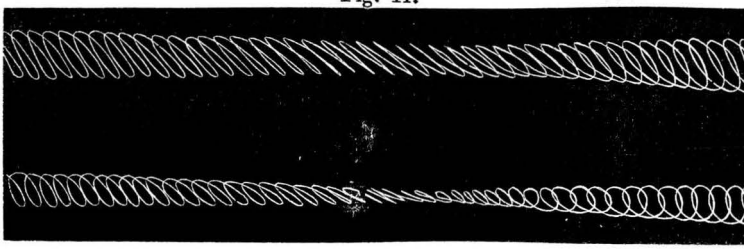
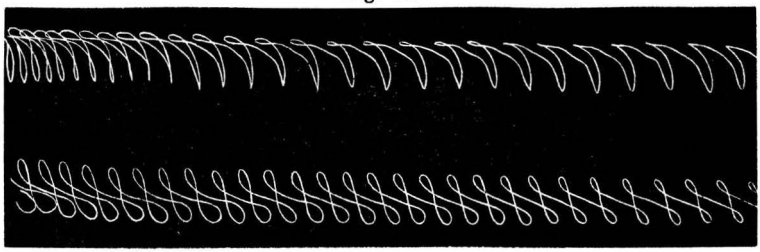
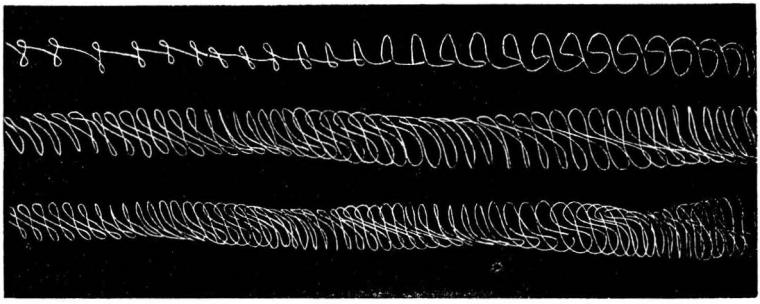


Fig. 42.



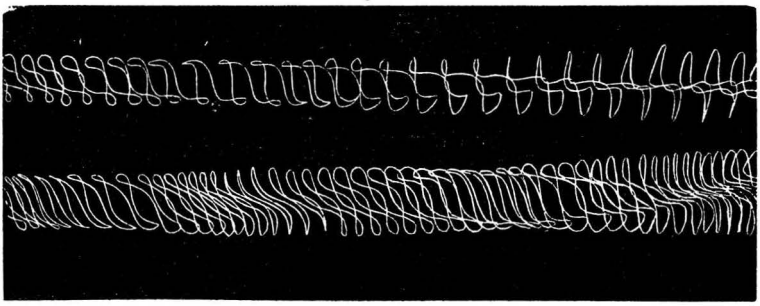
⊥
(1 : 2)

Fig. 43.



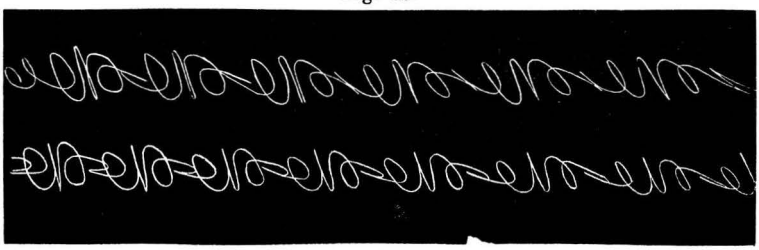
⊥
(1 : 2±)

Fig. 44.



⊥
(1 : 3±)

Fig. 45.



⊥
(4 : 5)

Fig. 46. (Glas.)

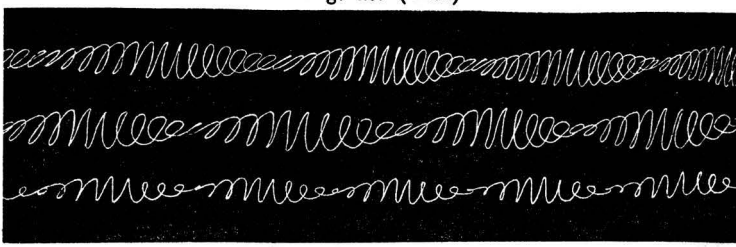
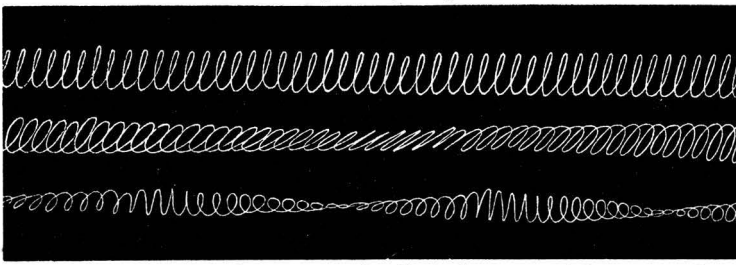


Fig. 47. (Glas.)



1) Die Abbildung des Apparats für die Anfertigung solcher von senkrecht combinirten Schwingungen herrührenden Tonzeichnungen findet sich in Fig. 20.

2) Sowol die auf dem Ruß des Papiers als des Glases einradierten Tonschriften sind hier möglichst treu wieder gegeben. Behufs dessen wurden die mit Tonschriften versehenen berußten Papiere in einer mit Wasser verdünnten Ätzkali-Lösung (1 Vol. concentr. Ätzkali-Lösung, 10 Vol. Wasser) durch 5 Minuten liegen gelassen. Die so angenässten Papierstreifen legte man mit der Schriftseite auf den Holzstock und mittelst kräftiger Pressung kam der Ruß, und also auch die Schrift auf den zu gravierenden Stock. Mehrere Versuche, mittelst Liegenlassens der berußten Papierstreifen im Wasser, zum Ziele zu gelangen, blieben ohne gutes Resultat. Das Wasser wäscht den Ruß sogleich vom Papier weg.

3) Die Glasstreifen, welche Tonschriften enthielten, wurden auf Holzstöcke mit lichtempfindlicher Oberfläche gelegt und dem Sonnenlichte durch $^1/_2$ Minute ausgesetzt.

4) Die Figuren 37, 38 und 39 sind derart abgenommen, als ob man den Glasstreifen so gegen das Licht hielte, dass man die radierte, berußte, rauhe Seite gegen das Gesicht gewendet hätte; mit den übrigen Abbildungen der Tonschriften auf Glas verhält es sich entgegengesetzt.

5) Die Tonschriften können auch einem großen Publicum mittelst eines Projections-Apparates vorgeführt werden. In solcher Weise hat Desains[17]) dieselben in den wissenschaftlichen Soiréen *de la Sorbonne* (1864) vorgeführt.

6) Die wiederkehrende Periode in den Tonzeichnungen wurde zwischen zwei auf die Wellenlinien senkrecht gerichtete Striche gefasst.

Fig. 48 führt eine Tonschrift vor, von welcher die obere Curve *d* mit einer Normal-Stimmgabel (Gabel-Diapason = $a^1 = 435$ Doppelschwingungen) unmittelbar, die untere *m* aber mittelst des Membran-Phonautographen (Fig. 23) mit einer Pfeife von nahezu gleicher Stimmung gleichzeitig angefertigt wurden.

Fig. 48.

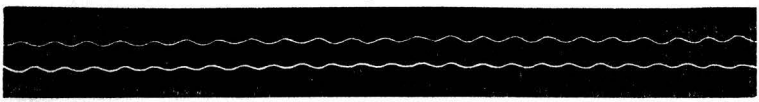


Fig. 49 liefert ein Tonbild unter den vorigen Umständen, nur dass hier eine Pfeife mit einer etwas anderen Differenz im Tone angewendet wurde.

Fig. 49.

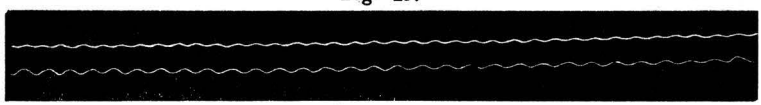


Fig. 50 zeigt die Tonschriften von der wie im vorigen angewendeten normalen Stimmgabel und von den soeben erwähnten, aber diesmal gleichzeitig ertönenden zwei Pfeifen. In Folge der Ton-Differenz beider Pfeifen zeigen sich die Bilder der „Stöße“ (vergleiche „Stöße“ im Capitel II, §. 17, 18 u. s. w.) sehr deutlich.

Fig. 50.

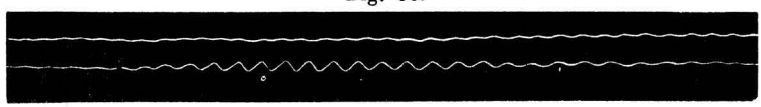


Fig. 51. Tonschriften unter den vorigen Umständen, nur wurden die Pfeifen jetzt so gestimmt, dass sie in derselben Zeit mehr „Stöße“ gaben.

Fig. 51.

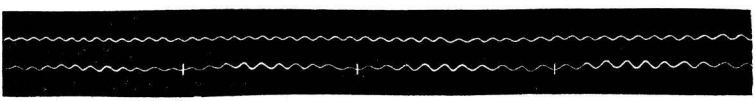


Fig. 52 bis 59. Tonzeichnung vermittelst des Membran-Phonautographen (Fig. 23), angefertigt für folgende Intervalle zweier Orgelpfeifen: (1 : 2), (8 : 15), (3 : 5), (2 : 3)

(3 : 4), (4 : 5), (5 : 6), (8 : 9). — Die untere regelmäßige Wellenlinie kommt von einer als Chronoskop angewendeten Stimmgabel von c^2 zu 512 Doppel-Vibrationen in der Zeitsecunde.

Fig. 52.

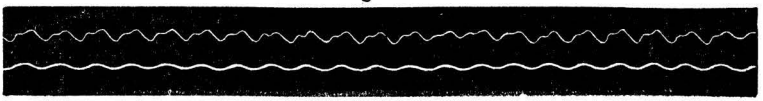


Fig. 53.

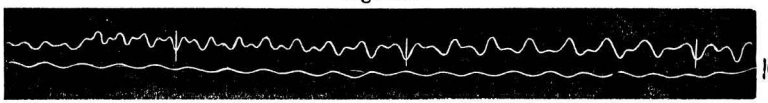


Fig. 54.



Fig. 55.

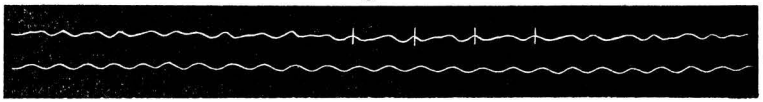


Fig. 56.

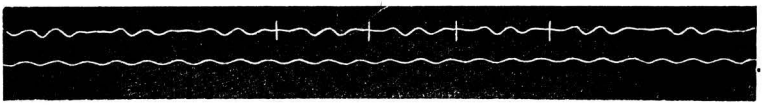


Fig. 57.

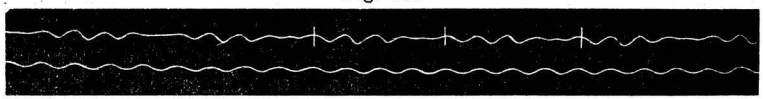


Fig. 58.

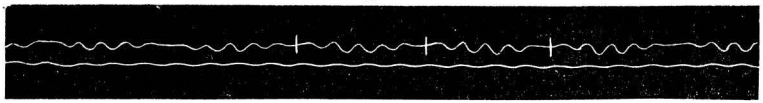
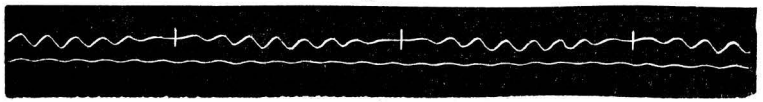


Fig. 59.



Die ganze Anzahl von Schwingungen einer stets gleich bleibenden, also wiederkehrenden Periode gibt die höhere Zahl des Tonverhältnisses an. Sie

ist auch hier durch zwei die Wellencurven rechtwinklig schneidende Geraden ersichtlich gemacht, welche die Wellenlinien durchschneiden.

47. Rückblick. Während die Klangfiguren und ihre Fixierung[18]) uns die ruhenden Stellen in tönenden Platten vor das Auge bringen, gestatten uns die Tonschriften, ein bleibendes Bild der Schwingungen von jeder Art tönender Körper zu gewinnen. Man hatte zwar schon früher Mittel (Cap. IV, Geschichte der optisch-akustischen Methode), kleinere Vibrationen sichtbar zu machen, wozu auch die Wellen gehören, welche Flüssigkeiten (Wasser, Öl, Eiweiss u. dgl. m.) zeigen, die man auf tönende Platten bringt[19]); aber keines der angewendeten Verfahrungsweisen vermochte die Bilder der Wellen zu fixieren und keines konnte für die Schwingungen aller tönenden Körper nutzbar gemacht werden.

48. Die Phonautogramme und die Reproduction der Schwingungen. Bedeckt man[20]) eines der oben abgedruckten Phonogramme mit einem Papier, welches einen sehr schmalen Ausschnitt (Spalte) besitzt, derart, dass durch die Spalte nur ein sehr kleines Stückchen der Curve zu sehen ist, und zieht das Phonogramm oder das Deckpapier langsam in gerader Linie nach rechts oder links — so ahmen die durch den Schlitz erscheinenden Punkte der Wellenlinie die Bewegung des ursprünglich tönenden Körpers nach, von dem die Tonschrift eigentlich herrührt; nur ist jetzt die Bewegung langsamer und lässt sich folglich mit dem Auge besser fassen. Der freundliche Leser wird hoffentlich diesen leichten und gewiss netten Versuch machen.

49. Die Phonautogramme bringen die Schwebungen vor das Auge. — Die phonographische Methode gibt uns ein treffliches Mittel, den ganzen Vorgang bei der Schwebung vor das Auge zu führen. Man fertigt mit jedem der beiden Körper, welche die Stöße erzeugen, unter ganz gleichen Umständen eine Tonschrift an, und legt dann die beiden Phonogramme mit ihren Anfangspuncten an einander. Da wo die Wellenberge und Wellenthäler vollkommen zusammenfallen, hat der „Stoß“ stattgefunden; wo sie vollkommen ent-

gegengesetzt gerichtet sind, war der Ton am schwächsten. Wenn man von beiden gleichzeitig tönenden, die Stöße hervorrufenden Körpern mittelst des Membran-Phonautographen (Seite 72, Fig. 23) ein Tonbild abnimmt, so drückt sich die Schwebung in der Größe der Abweichung der Berge und Thäler von der Geraden (Abscisse) sehr deutlich aus. Dr. Politzer (Dr. der Ohrenheilkunde in Wien) und König[21]) in Paris haben vereint mittelst ähnlicher Phonogramme nachgewiesen, dass auch die Gehörknöchelchen die Bewegungen bei der Schwebung nachahmen.

Sie haben nämlich das Schreibfederchen an den Gehörknöchelchen einer Aente befestigt und mittelst zweier Lippenpfeifen die Schwebung hervorgerufen.

50. Akustisches Album von König. Eine vollständige Sammlung trefflich ausgeführter Tonschriften hatte König[22]) in den Ausstellungspalast nach London (1862) gebracht. Das Album enthielt:

I. Tonhöhenbestimmungen nach der Methode der Phonogramme, wobei eine Stimmgabel als Zeitmesser gedient hatte.

II. Combination zweier zu einander parallelen Schwingungsbewegungen an zwei verschiedenen Körpern nach Lissajous und Desains. (Apparat hiezu in Fig. 18.)

III. Combination zweier zu einander parallelen Schwingungsbewegungen in einem und demselben Körper.

IV. Combination zweier zu einander senkrechter Schwingungsbewegungen in zwei verschiedenen Körpern. (Apparat hiezu in Fig. 20.)

V. Combination zweier rechtwinkliger Schwigungsbewegungen in demselben Körper.

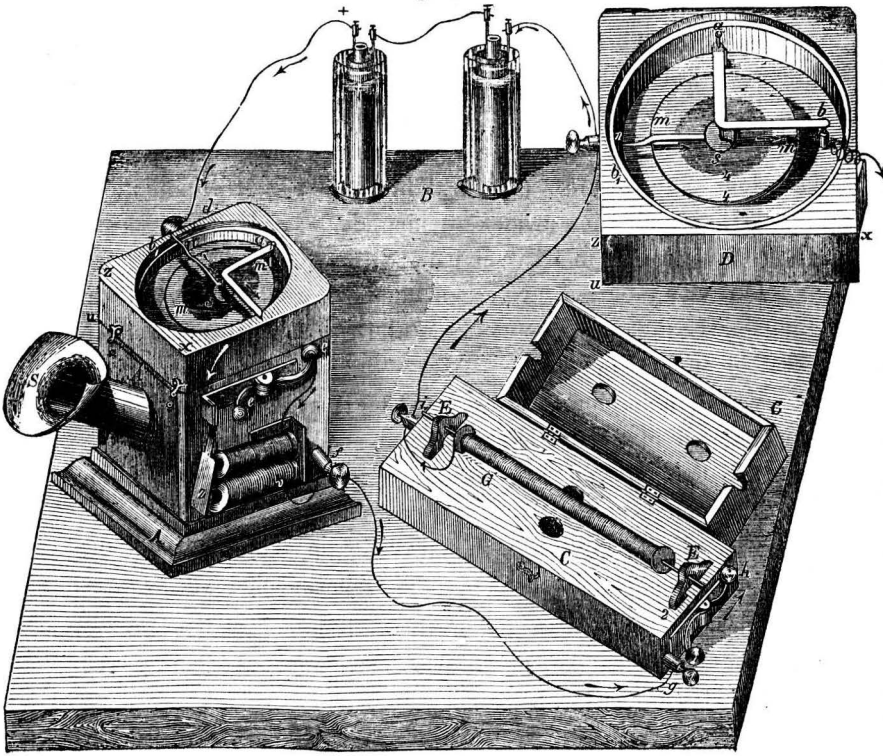
VI. Proben von Tonschriften, angefertigt mit dem Membran-Phonautographen.

VII. Physiologischer Theil. Zeigte Tonschriften der Schwingungen der Membranen- und Gehörknöcheln des Ohres.

Diesen Tonschriften lagen theoretisch construirte Curven und Photographien der zu ihrer Anfertigung gebrauchten Apparate bei. (Fig. 18, 20, 23.)

51. Princip des „Telephon“ von Reis. *a)* Verwandt mit dem Membran-Phonautographen ist das „Telophon“ (Fig. 60) von Reis[23]). Auf dem Häutchen *m m* ist in der Mitte das runde Ende *s* eines leichten Platinstreifens *ns* mit Klebwachs so befestigt, dass der Platinstreif alle Schwingungen der Membrane mitmachen kann. Sehr nahe dem in der Mitte befindlichen Ende *s* des Platinstreifchens *ns* steht eine Platinspitze derart, dass dieselbe beim Schwingen der Membrane von dem mit der letzteren schwingenden Platinstreifen berührt wird. Denken wir uns nun das äußere Ende *n* des Platinstreifens *ns* und die Platinspitze mit den Polen einer galvanischen Batterie verbunden; so wird beim Schwingen der Membrane der galvanische Strom je nach den Schwingungsphasen abwechselnd hergestellt und unterbrochen. Ein in diese Stromleitung eingeschaltetes elektromagnetisches Glockenwerk oder ein eingeschalteter elektromagne-

Fig. 60.



tischer Telegraph würden nach weiten Entfernungen Zeichen geben, dass Jemand spricht; aber sie würden selbstverständlich nicht anzugeben vermögen, was man spricht.

b) Bekanntlich geräth ein Eisendraht, der von häufig unterbrochenen, kräftigen galvanischen Strömen umflossen ist, in's Tönen, das nach Umständen ein longitudinales, transversales oder beides zugleich sein kann [21]). Einen solchen in einem multiplicierenden Drahtgewinde *G* liegenden Eisendraht schaltete Reis auf der zweiten Station *C* ein. Dieser gab dann Töne, wenn die Membrane durch Hineinsingen oder Hineinsprechen (bei *S* Fig. 60) in den hohlen, würfelförmigen Theil *A* in's Schwingen gebracht wurde. Bei den von mir angestellten Versuchen mit dem Telephon änderte der Stab bei den verschiedenartigsten Tönen und Klängen nie seine Tonhöhe und gab immer nur den Rhytmus der bei *S* in den Theil *A* hineingesungenen oder gesprochenen Worte. Aus dem Rhytmus ließ sich in der Regel die Arie des hineingesungenen Liedes erkennen. Hierüber folgen im Paragraph 53 die speciellen Versuche. Soviel ist jedoch schon hier klar, dass es mit den gleichzeitigen Concerten, Gesangsproductionen in verschiedenen Städten, wie die Tagszeitungen sanguinisch hofften, vorläufig noch Zeit habe. Der Apparat von Reis ist wol ein „Telephon", aber kein „phonischer Telegraph". Das einzige Fortpflanzungsmittel für Gesang und Sprache, und dies nur für mäßige Entfernungen, bleibt das alte bekannte Communications-Rohr. Indessen zählt das Experiment von Reis immer zu den schönsten und interessantesten Schulversuchen. Und da die Mittel dazu so einfach sind, so wird der Apparat von Reis gewiss auch bei nur mäßig dotirten Lehranstalten schnell Eingang finden. Dass das Tönen des Drahtes beim Telephon nicht durch akustische Fortleitung geschieht, zeigt man durch Ausschließung der Spule aus dem Stromkreise — sogleich hört das Tönen auf.

1. Den Phonautograph bei Reiss lieferte ursprünglich ein Holzwürfel mit konischer Bohrung. Die kleinere Öffnung war mit der Membrane bespannt. Den tönenden Draht gab eine Stricknadel ab, die auf jeder Seite der Multiplicatorspule um 2″ aus demselben herausragte und auf zwei Stegen eines Resonanzkastens lag. Das umgehende Gewinde bestand aus 6 Lagen dünnen

Drahtes. Fig. 60 zeigt das Telephon, wie es nach Angabe vom Erfinder, gegenwärtig vom Mechaniker Albert in Frankfurt und Mechaniker Hauck in Wien angefertigt wird.

2. Wenn auch das Telephon nicht dazu dienen kann, ein Concert zu reproducieren, so kann dies für mäßige Entfernung dennoch durch die Resonanz der festen Körper, wenn auch in engen Grenzen, bewirkt werden. Pepper[35]), Director des für die amüsante Wissenschaft geschaffenen polytechnischen Institutes in London, gab ein solches (1855) nach dem Vorgange Wheatstones. Vier Harfen von Erard standen auf der Bühne. Jede derselben hatte an ihrem Resonanzboden einen kurzen 2^{cm} dicken Stab von Tannenholz. Durch Drehung der Harfen um ihre Axe kam dieses Stabstück an ein ganz gleiches zu liegen, welches in den tiefen Keller reichte und hier beziehungsweise den Resonanzboden eines Claviers, den Stimmstock eines Violoncello's, einer Violine und das Mundstück einer Clarinette berührte. So lange die Resonanzstäbe sich berührten, hörte man das Concert ganz deutlich, wie aber eine oder alle Harfen ausser Berührung mit dem schallleitenden Stab kamen, verstummte die Musik. Auch der Charakter der ursprünglich tönenden Körper war im Ganzen gewahrt; nur der Violoncello-Ton kam etwas heiser.

52. *Näheres über das Telephon.* *a)* Dasselbe (Fig. 60) besteht im Wesentlichen:

1. aus dem Zeichengeber A;
2. aus dem Zeichenbringer C;
3. aus der galvanischen Batterie B und endlich
4. aus den verbindenden Leitungsdrähten.

b) Der Zeichengeber A ist der Hauptsache nach ein parallelepipedischer Körper aus Holz. Der obere Theil ux desselben ist aus einem Stück geschnitten, mit quadratischem Querschnitt, dessen Seite $zx \ldots 9^{cm}$ und dessen Höhe $ux \ldots . 2.8^{cm}$ beträgt.

Dieser Theil ist mittelst Charnier am unteren Kästchen AA beweglich. Legt man den Deckel xu zurück, so bemerkt man an demselben einen kleinen Kreis ausgeschnitten von $3{\cdot}9^{cm}$ Durchmesser. In dieses Loch passt ein messingener Reif mit 8^{mm} breiter Rand, der wie eine Rolle an der Seite mit einer Rinne versehen ist. Über den Reif ist die Membrane mm mittelst eines in der Nut desselben liegenden Seidenfadens gespannt. Diese kreisförmige Membrane ist von einem weiteren, kreisförmigen Ausschnitte $b b_1 = 8.5^{cm}$ umgeben. Ein schaufelförmiges Platinstreifchen ns liegt leitend an der messingenen Zuleitschraube d und fällt mit dem kreisförmigen Theile s in in das Centrum der Membrane.

Mittelst etwas Klebwachs wird dieser kreisförmige Theil an der Membrane befestigt und ist dadurch gezwungen, die Vibrationen der Membrane mitzumachen. Die Weiterleitung des galvanischen Stromes vom Centrum der Membrane geschieht mittelst des messingenen Winkels *asb* (*D*, Fig. 60). Derselbe liegt in *s* mittelst eines Platin- oder Stahlstiftes auf dem zuleitenden Platinstreifen *ns*, taucht bei *b* mit einer Platin- oder Stahlspitze in ein Näpfchen mit Quecksilber, welches in einer Schraube geschaffen wurde, die den Strom weiter leitet. Der Punct *a* dient nur als Unterlage für den Winkelhaken *asb*, der überhaupt wie ein Dreifuß gestützt wurde, damit der Berührungspunct *s* möglichst constant bleibe. Der Haken *asb* wird ganz einfach mit einer bei *a* befindlichen Öffnung über einen hervorstehenden Stift geschoben, bis er auf einem breiteren, unteren Theil liegen bleibt. Von *b* aus geht die galvanische Leitung mittelst eines gewundenen Drahtes zum Messingschlüssel *e* (*A* Fig. 60) und von da in der durch die Pfeile angedeuteten Richtung weiter.

Der untere Theil *AA* des Zeichengebers ist aus Holzbrettchen zusammengefügt und bildet im Lichten ein Parallelepiped, dessen Höhe = 6.8^{cm} und dessen Breite = 7.7^{cm} ist. Zur Aufnahme der Töne dient der aus Blech verfertigte schiefe Ansatz *S* mit trichterförmiger Erweiterung. Die längere Seite dieses Ansatzes beträgt 6.7^{cm}, die kürzere 4.7^{cm}; der Höhendurchmesser der Erweiterung misst 7·15^{cm}, der Breitendurchmesser 7.5^{cm}, und endlich der Durchmesser der engeren Röhre 3·9 ^{cm}.

Es ist klar, dass im Nothfalle der Platinstreifen durch einen Streifen dünnen Messingblechs, die Platin- oder Stahlspitzen durch eiserne Spitzen vertreten werden können. Nur müssen dann die Berührungspuncte öfter bis zum metallischen Glänzen geputzt werden.

c) Der Zeichenbringer *C* ist im Wesentlichen ein doppelter Resonanzkasten, dessen oberer Theil, „der Deckel" an zwei Charniers beweglich ist und sich zurücklegen lässt. Die Länge dieses Deckels beträgt 16·4^{cm}, dessen Breite 9.5^{cm} und dessen Höhe 3·2^{cm}. Die Länge des unteren Kastens misst 22·9^{cm} dessen Breite 9·6^{cm} und die Höhe desselben 2·5^{cm}. Der untere

Theil des Resonanzkastens trägt 2 hölzerne Stege, welche um 7.4^{cm} von einander abstehen, und die als Träger der zum Tönen bestimmten 21·5^{cm} langen und 0·9^{mm} dicken Eisennadel dienen. Die Länge der über letztere geschobenen, für das Elektromagnetisieren bestimmten Spule ist 15^{cm}. Die hölzernen Decken beider Theile müssen möglichst dünn geschabt werden und die grösste Weite der aus der Figur ersichtlichen kreisförmigen Ausschnitte misst 13^{mm}.

d) Als Batterie kann man sich einer kleinen vierelementigen Smee'schen Batterie oder zweier grösserer Bunsen'scher Elemente mit Erfolg bedienen. Die Leitung wird wenigstens so lang genommen, dass man die erregenden Töne nicht mehr vernimmt. Zur Correspondenz beider Stationen hat der Erfinder die aus der Vorrichtung ersichtliche und leicht verständliche elektro-magnetische Telegraphen-Vorrichtung *evgh* angebracht. Über die entsprechenden Zeichen kann man sich leicht verständigen und es ist am einfachsten, die vom Erfinder aufgestellten Zeichen anzunehmen[26]).

Der Zeichenbringer *C* gibt beim Klopfen mit dem Taster *e* die entsprechenden telegraphischen Zeichen durch Tönen des Stabes *EE*, während am Zeichengeber *A* der Elektromagnet *v* mittelst des federnden Ankers *z* die Zeichen kundgibt.

53. Versuche mit dem Telephon. a) Sobald man den Mund an den Trichter *S* bringt und singt, geräth die Membrane des Zeichengebers *A* in entsprechende Schwingungen und das Eisenstäbchen *E E* auf der zweiten Station fängt zu tönen an. Jedesmal wenn auf der ersten Station bei *s* ein Funke sichtbar wird, tönt der Stab gewiss in der andern Station. Das Gleiche gilt, wenn man den eigenthümlich schnarrenden Ton vernimmt, welcher durch das Anschlagen des vibrierenden Platinblättchens auf den darauf ruhenden Stift des Winkelhakens entsteht. Das Auftreten dieser Funken oder des eigenthümlichen Schnarrens am Zeichengeber *A* gibt also das Kennzeichen für die Beobachter an der Station *A*, dass in *C* der Stab tönt. Töne und Melodien, welche in den Schallbecher *S* hinein ge-

sungen wurden, und besonders Klänge, bei welchen die Zähne und Kopfknochen mit vibrierten (sogenannte Brummtöne), bewirkten stets ein Tönen des Stabes oder der Nadel *EE*, und zwar, wie schon erwähnt (§. 51), ohne Änderung der Tonhöhe, blos mit Wiedergabe des Rhythmus des betreffenden Liedes oder der betreffenden Worte.

Die Höhe des in *C* am Stabe *EE* erregten Tones war bei dem mir zu Gebote stehenden Apparate h^1; seine Stärke nicht sehr bedeutend und dessen Klang schnarrend, ähnlich jenem des Tones einer schwachtönenden Zungenpfeife (etwa eines hölzernen Kinder-Trompetchens). Als Membrane dient am besten das um den Herzbeutel kleinerer und selbst grösserer Säugethiere (von Kälbern etc.) liegende Häutchen. — Goldschlägerhäutchen geben nur tiefere Töne wieder. Der Deckel des Resonanzkastens zeigte sich bei meinem Apparate überflüssig und der Ton war sogar ohne Deckel etwas stärker.

1. Bei den Versuchen mit dem Telephon muss man fleißig nachsehen, ob das Ende *s* des Platinstreifchens noch an der Membrane klebt, und man muss es im Nothfalle an die Membrane drücken. Wenn das Plättchen nicht mehr haften will, erhitzt man eine Messerklinge, berührt damit ein Stückchen Klebwachs und überträgt so das geschmolzene Pickwachs an die untere Seite des runden Endes am Platinstreifen *ns*. Gleich darauf wird derselbe an die Membrane *mm* gepresst.

2. Aus einer größeren Reihe von Versuchen, welche ich mit dem Telephon anstellte, erlaube ich mir einige Resultate hieher zu stellen:

a) Eine Cagniard-Latour'sche Sirene mit lothrecht aufrecht stehender Axe nahe der Zuleitöffnung *S* von den tiefsten bis zu den höchsten Tönen angeblasen, blieb ohne Resultat. Erst als die rotierende Platte dem schallauffangenden Trichter *S* direct zugewendet und sehr nahe gebracht wurde, waren zweimal bei den mittelhohen Tönen der Sirene zwei kurze Töne des Eisenstabes *EE* von der Höhe h^1 zu hören.

b) Eine Stimmgabel mit dem Normalton a^1 erregte weder in der unmittelbarsten Nähe des Schalltrichters *S* noch beim Anlegen an diesen irgend einen Ton am Zeichenbringer *C*.

c) Eine metallene Glocke, die je nach dem Streichen mit einem starken Haarbogen den Ton h^1 oder dis^2 gab, blieb in Beziehung auf das Telephon wirkungslos, man mochte die Glocke noch so nahe der Schallröhre *S* rücken oder sie an letztere anlegen. Erst als der Ton h^1 vermittelst einer passenden

Resonanzröhre sehr bedeutend verstärkt wurde, sprach das Telephon schwach und kurz an, und zwar wieder mit h^1.

d) Hölzerne Labialpfeifen innerhalb der zu c^1 und c^2 gehörigen Scalen, wenn man sie mit den Wänden ihrer Röhren an den Schalltrichter *S* anlegte und zum Tönen brachte, vermochten das Telephon nicht zum Tönen zu bringen; meistens aber wurden sie in Beziehung auf das Telephon wirksam, wenn das untere offene Ende der Röhre unmittelbar vor der oder in die Öffnung *S* der Zuleitröhre des Schalles am Zeichengeber *A* gebracht wurde; diese Lage mag die „erste" heißen. Ebenso zeigten sich diese Pfeifen in Hinsicht auf das Telephon von Erfolg, wenn man ihren Mund (den Ausschnitt) an die schallzuleitende Öffnung *S* legte. Diese Lage mag von jetzt an die „zweite" genannt sein. — Wurden die Pfeifen in beiden Lagen von dem Schallfänger *S* auch nur um einige Linien entfernt, so unterblieb das Erfolg bringende Schwingen der Membrane, und zwar in der ersten Lage früher als in der zweiten. — Wenn jedoch an die zuleitende Schallröhre verschieden lange (1 Fuß bis über 8 Fuß) und verschieden weite Röhren aus beliebigem Materiale angelegt wurden und an diese die vorigen Pfeifen in der ersten oder zweiten Lage; so gab das Telephon die nämlichen Resultate wie beim unmittelbaren Gebrauche der kurzen Zuleitröhre.

e) Die vorigen Pfeifen, wenn sie gedeckt wurden, brachten (wie vorauszusehen war) in der ersten Lage das Telephon meistens gar nicht oder unterbrochen zum Tönen. In der zweiten Lage erregt sie das Telephon meist vollkommen, selten unterbrochen.

f) Pfeifen aus der Tonleiter c^3 standen mir nicht zu Gebote. Töne aus letzterer Tonleiter, welche durch verstärktes Anblasen an den von mir gebrauchten Pfeifen erregten wurden, blieben meist ohne Resultat, welche Lage auch der Pfeife ertheilt worden sein mag.

g) Eine Zungenpfeife vom Tone d^{-1} mit aufschlagender Zunge erregte erst dann den Stab des Telephons, als das offene Ende des letzteren dem schallauffangenden Trichter *S* des Zeichengebers *A* zugewendet und nahe gebracht wurde. Die Verstärkung des Tones durch einen aufgesetzten Schallbecher bewirkte einen unterbrochenen Ton. In ähnlicher Weise verhielt es sich mit einer Zungenpfeife vom Tone c^{-1} mit durchschlagender Zunge; nur war hier der erregte Telephon-Ton stets unterbrochen.

h) Das Miniatur-Normal-Diaspason (eine kleine Zungenpfeife mit dem Tone a^1 (vergl. Cap. VI) in die schallzuleitende Röhre eingesenkt, so dass der Mund am Schallbecher lag, erzeugte, kräftig angeblasen, am Telephon einen deutlichen Ton.

i) Märsche, welche mit dem Taster *e e* an *A* getrommelt wurden, gab der Zeichenbringer *C* wieder, und zwar wie immer mit dem Tone h^1.

k) Das Singen verschiedener Melodien war stets von Erfolg; der Rhythmus des Sprechens wurde nur unterbrochen wieder gegeben.

l) Das Hineinpfeifen mit dem Munde bei *S* blieb ohne Resultat, und der Ton sprang in einen höheren über, wahrscheinlich weil die Pfeife dadurch eine kürzere wird. Die durch Pfeifen mit dem Munde hervorgebrachten Töne f^1, g^1, a^1, fis^1, c^1 und cis^1 sprangen beziehungsweise in fis^1, gis^1, b^1, g^1, cis^1 und d^1 über, sobald der Mund unmittelbar vor dem Schallfänger *S* zu liegen kam. Die Erhöhung betrug also einen halben Ton. — Ähnliche Tonerhöhungen erhält man beim Hineinpfeifen in eine Tasse, in einen Hut u. dgl. m. Ja bei solchen Pfeifen erhöht schon das Abschneiden des vom Munde kommenden Luftstromes mittelst der flachen Hand den Ton, was man beim raschen Auf- und Abbewegen der Hand sehr deutlich erkennt.

m) Da das deutliche Schnarren des Platinblättchens am Zeichengeber *A* ein sicheres Zeichen ist, dass der eiserne Stab *EE* in *C* tönt; so bedarf es in dieser Beziehung keiner telegraphischen Verständigung (§. 52, *d*) zwischen den Stationen.

b) Vergleicht man die Ergebnisse der Versuche mittelst des Telephons mit jenem am Membran-Phonautographen, so wird es anfangs scheinen, als ob letzterer viel zu wenig im Vergleiche mit ersterem leistet. Dieser Widerspruch verschwindet jedoch bald. Auch der Membran-Phonautograph liefert deutliche Tonschriften von einer Melodie innerhalb einer Octave sammt Doppeltönen und Accorden und nach Donders noch vielmehr. Überdies wird beim Telephon die Membrane nicht allein von den Schwingungen jenes Tones bewegt, durch welche sie nach den Gesetzen des Mittönens zum Schwingen gebracht werden kann; sondern sie wird auch mechanisch durch die bei den erregenden Tönen (Singen etc.) entstehenden starken Verdichtungen und Verdünnungen in der abgeschlossenen Luftmasse gehoben und gesenkt. Jede Verdichtung wird die Membrane hinausdrücken, selbst wenn der tiefste Eigenton derselben viel höher liegt als der erregende (gesungene) Ton. Sehr starke und dicke Membranen könnten vielleicht dieser rein mechanischen Anregung widerstehen, wären aber dann auch für das eigentliche Mitschwingen nicht genug empfindlich. Die Bewegung der Membrane am Telephon erfolgt also in vielen Fällen (z. B. beim Trommeln mit dem Taster an den Kasten, beim Stehen des Apparates *A* auf der Resonanzdecke eines Claviers etc.) nur in der Weise wie die Membrane an König's Pfeife zum Nachweise der Schwingungsknoten (vergl. in einem späteren Paragraphen). Bei dieser hängt es auch

nicht von der Spannung der Membrane ab, damit letztere die Verdichtungen und Verdünnungen der Luft in der Röhre nach außen hin anzeige.

Einen weiteren Beleg hiezu bieten ferner Pfeifen mit dünnen Wänden. Die letzteren lassen die Zitterungen empfinden, wenn man sie mit der Hand berührt, während die Pfeifen tönen; ja sehr dünne Wände vertiefen sogar etwas den Ton und zeigen dadurch an, dass sie dem von den Verdichtungen herrührenden Drucke nicht zu widerstehen vermögen.

Der Sand, mit dem man derartige Wände bestreut, wird von den Knotenpuncten fortgeworfen. Wenn demnach dünne Holzstreifen in solcher Weise die Schwingungen der Luft in der Pfeife nachzuahmen vermögen, obwol der Eigenton der Wand weit ab vom erregenden Ton liegen kann; so ist wol dies bei einer Membrane umsomehr der Fall. Auch sprechen dafür die im vorigen Paragraph angeführten Versuche mit den Pfeifen, welche nur dann ein Resultat am Telephon gaben, wenn das offene Ende oder der Mund der Pfeifen sehr nahe am Schallfänger lagen; ja selbst die Versuche mit dem Singen bestätigen diese Ansicht. Gerade diese Versuche zeigen das Telephon schwächer im Vergleiche mit dem Membran-Phonautographen, indem bei letzterem, wenn die Membrane für einen Ton gestimmt ist, die Tonschrift kommt, was die erregende Tonquelle auch immer für eine Lage gegen die schallauffangende Seite des Membran-Phonautographen haben mag, wenn sie nur genug nahe gerückt ist. Und doch sollte man meinen, dass zum Schließen der Batterie mittelst des vibrierenden Platinplättchens an der Membrane weniger Kraft gehört als zu einer Bewegung des Federchens derart, dass es den Ruß am Schreibcylinder wegzunehmen vermag. Die Ergebnisse der wenigen Versuche mit dem Telephon scheinen übrigens darauf hinzudeuten, dass es vielleicht für die leichtere Anfertigung von Tonschriften mittelst des Membran-Phonautographen vortheilhafter wäre, die letzteren von kleineren Dimensionen anzufertigen, als dies bisher geschah. In der That beschäftigt sich auch König bereits mit neuen Anordnungen für den Membran-Phonautographen. König hofft schon

ein besseres Resultat für die schriftliche Wiedergabe gesungener einfacher Melodien, wenn man die weite Öffnung des Paraboloides beim Membran-Phonautographen mit einer Platte verschlöße, welche eine kleine Öffnung für das Anlegen des Mundes hätte.

Jedenfalls wird ein erneuertes Studium der Gesetze des Mitschwingens der Membranen mit besonderer Hinsicht auf beide Apparate nothwendig werden. Viele meinen, die Membranen müßten bei jedem Tone mitschwingen, weil man ja alle Töne durch Vermittlung der Membranen im Ohre höre; in dieser Beziehung ist aber sehr wichtig, dass nach Prof. Mach[27]) dies durch einen eigenen Accommodations-Mechanismus im Ohre bewirkt werden dürfte. Für mich hat diese Annahme einer Accommodation bezüglich der variirenden Spannungen des Trommelfells einen bis an Gewißheit grenzenden hohen Wahrscheinlichkeitsgrad.

Ph. Reis zeigte seinen Apparat das erstemal im October 1861 der physikalischen Gesellschaft zu Frankfurt a. M. in sehr primitiver Form; am 4. Juli 1863 derselben Gesellschaft von der in Fig. 60 dargestellten Form. Diesmal experimentierte er auf eine Entfernung von 300 Fuß. — Professor Böttger führte den Apparat der Naturforscher-Versammlung zu Stettin (1863) in der Section für Physik vor.

IV.

Anwendung der Optik in der Akustik.

54. Princip der optisch-akustischen Methode. *a*) Die für die graphische Methode angefertigten Stimmgabeln (Fig. 22) hat König auch so eingerichtet, dass man damit die schönen Versuche von Lissajous[1]) wiederholen kann. Zu diesem Behufe trägt (Fig. 19) das obere Ende einer jeden Stimmgabel an der äußern Seite einen ebenen Metall- oder Glasspiegel und an der symmetrischen Stelle der zweiten Zinke, ebenfalls nach außen, ein gleichgeformtes Gegengewicht. Damit wir es mit einfachen Bildern zu thun haben, nehmen wir vorläufig an, der Spiegel sei aus Metall. Leitet man auf einen solchen Spiegel im Dunkeln durch eine kleine Öffnung einen Strahl kräftigen Lichtes, und bringt die Gabel durch Streichen mit einem starken Haarbogen in's Tönen, so wird das Bild der Lichtöffnung oder des leuchtenden Punctes, wegen der Nachwirkung auf der Netzhaut, d. i. wegen des bekannten taumatropischen Principes[2]) zur leuchtenden Linie ausgedehnt, wahrgenommen. Eine glühende Kohle rasch hin und her bewegt, gibt die nämliche Erscheinung. Dreht man die schwingende Gabel um ihre Axe, so ist dadurch dem Übereinanderlagern der Bilder auf der Netzhaut vorgebeugt, und man erblickt dann eine Zickzacklinie, als die den Schwingungen entsprechende Wellencurve.

b) Objective Darstellung. Bei Anwendung eines sehr kräftigen Lichtes, z. B. der Sonne, der Elektricität oder des Hydroxygengases, wird man die vorhin erwähnten Versuche auch auf einem weißen Schirme projicieren und so Vielen zugleich ersichtlich machen können. Es ist dann vortheilhaft,

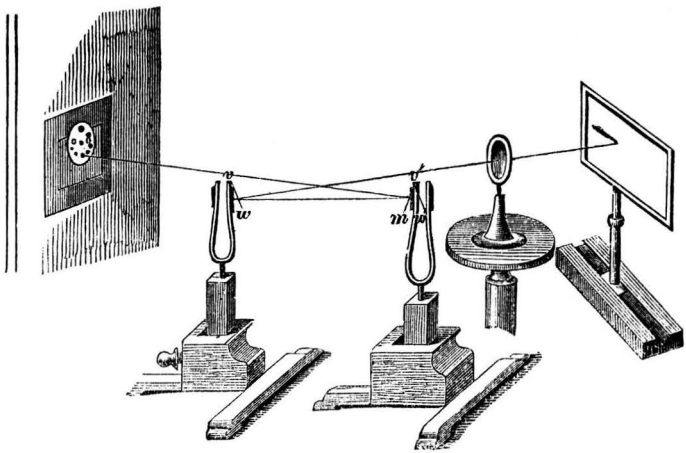
das reflectirte Licht im Puncte, wo es die weiße Wand trifft, zu concentrieren, weshalb man es zuvor durch eine Sammellinse leitet, welche um ihre Brennweite von der das Licht auffangenden Tafel absteht.

In ähnlicher Weise kann man auch andere vibrierende Körper mit Spiegel versehen, um die Schwingungen besser ersichtlich zu machen. Ein Termophon (Wackler, Wieger von Trevelyan[3]) in passender Weise mit einem Spiegel adjustiert würde wahrscheinlich seine Bewegung in weiterer Entfernung, mittelst eines Lichtstrahles, zeigen.

55. Combination zweier paralleler Schwingungsrichtungen von zwei Stimmgabeln.

a) Die Zusammenstellung des Apparates für diesen Fall ist aus Fig. 61 von selbst klar.

Fig. 61.



1. Schwingen die beiden Gabeln so, dass ihre Spiegel dabei stets parallel bleiben, d. h. beginnen sie gleichzeitig ihre Bewegung nach derselben Seite hin, passieren gleichzeitig die Ruhelage, und behalten dabei stets die gleichen Elongationen, oder kurz gesagt, haben sie die nämliche Schwingungsphase und Schwingungsweite, so zeigt das reflectierte Bild auf der weißen Wand ein Minimum der Ausdehnung, d. h. es erscheint als Lichtpunct.

Kommt (Fig. 61) die Spiegelfläche der Gabel v in die Lage $v\ w$, d. h. ändert sie beim Schwingen ihre Lage um den Winkel α, so verschiebt sich

(nach den Gesetzen der Katoptrik) das Bild auf der weissen Wand um das Doppelte, folglich um 2 α. Ein Gleiches gilt von dem Spiegel v^1, bezüglich der Lage v^1 w. Die Verrückung des Bildes ist hier gleich 2 β. Da aber die Spiegelebenen vom Anfange her nach entgegengesetzten Seiten, d. h. genau einander gegenüber gerichtet sind und es auch beim Vibrieren bleiben, so müssen ihre Schwingungen ebenfalls entgegengesetzt gerichtet sin. Da diese Schwingungen einander gleich sind, so heben sie sich auf, und das Auge wird folglich keine Verlängerung des Lichtpunctes zum Striche, sondern nur einen Punct wahrnehmen.

2. Schwingen die beiden Gabeln derart, dass zwar beide Spiegel gleichzeitig durch ihre Ruhelage gehen, aber nach entgegengesetzten Seiten, d. h. gegeneinander, so zeigt sich das zurückgeworfene Licht im Maximum der Ausdehnung, mithin als Strich, und zwar von der möglichst größten Länge.

Diesmal haben nämlich die Spiegelebenen die Lagen $v\,w$ und $v_1\,m$ gegeneinander. Die Verschiebung des Bildes wegen des einen Spiegels beträgt 2α, wegen des andern 2β, wegen beider, weil hier die Bewegung des Bildes in gleichem Sinne erfolgt, $2\,(\alpha+\beta)$, oder, wenn die Amplituden beider Spiegel gleich sind, 4α.

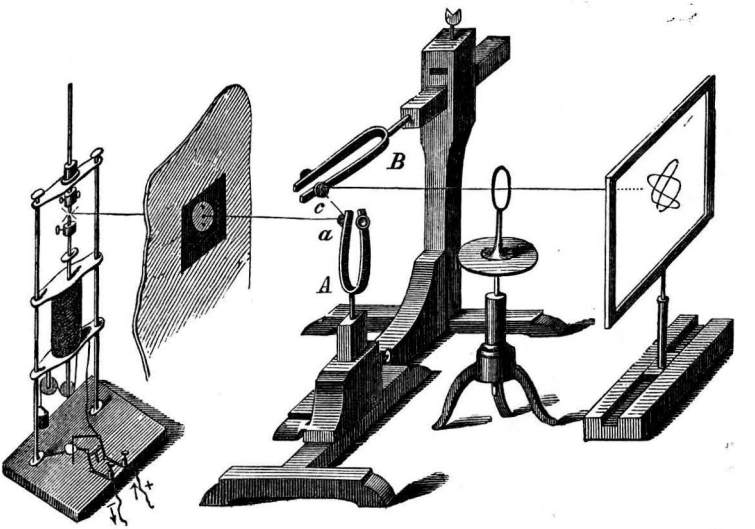
3. Passieren die Spiegel nicht gleichzeitig die Ruhelage, so wird die Länge des Bildes zwischen dem erwähnten Maximum und Minimum liegen, und von der Differenz der Schwingungsphasen abhängig sein. Das Bild muss sich folglich als mehr oder minder langer, gerader Strich zeigen.

b) Sind beide Stimmgabeln im genauen Einklange, so wird man, je nach dem erörterten Phasenstande, einen Punct oder eine längere oder kürzere gerade Lichtlinie wahrnehmen. Diese Bilder bleiben constant, bis auf die Veränderung, welche vom Abklingen der Gabeln herrührt, und die sich leicht beurtheilen lässt. Wird der Einklang um ein Geringes gestört, etwa dadurch, dass man an die Zinke einer der Gabeln ein kleines Stückchen Wachs klebt (pg. 25), so wechselt in Folge dessen der gegenseitige Phasenzustand, und es werden die vorhin angeführten drei Fälle alternierend eintreten. Der Lichtpunct wird sich nacheinander zur größten Geraden ausdehnen, und wieder zum Kleinsten zusammenziehen. Die größte Ausdehnung der Lichtgeraden fällt mit den „Stößen“ (§. 17) zusammen, wobei die Verkürzung wegen des Abklingens zu

beachten ist. Und da die Anzahl der Stöße für die gleiche Zeit dem Unterschiede der Tonhöhen proportional ist (§. 18), so leuchtet ein, dass durch Beobachtung der Lichterscheinung der Unterschied zweier naheliegenden Töne ohne Hilfe des Ohres beurtheilt werden kann. Verändert man die Stimmung der einen Gabel so lange, bis die Lichterscheinung nicht mehr wechselt, bis der Lichtpunct oder die Lichtlinien unverändert bleiben, so sind die Gabeln im Einklange. Man sieht also, dass auf diesem Wege selbst ein Tauber (!) die Gabeln gegeneinander trefflich stimmen könnte. Noch sicherer wird er dies mittelst des folgenden Verfahrens zu Stande bringen. Und weil dabei für die verschiedenen Ton-Intervalle und Schwingungsphasen je andere Lichtfiguren auftreten, so wird er aus der Figur auch das Tonverhältnis und (was das Ohr nie vermag) den Phasenstand abzusehen vermögen.

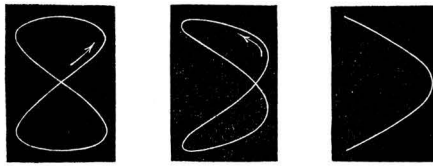
56. Combination zweier rechtwinkeliger Schwingungsrichtungen von zwei Stimmgabeln. Die Zusammenstellung des Apparates für diesen Fall zeigt Fig. 62. Man sieht, dass hier die Schwingungsebene der einen Gabel wagrecht, die der an-

Fig. 62.



deren scheitelrecht liegt. Sind die Gabeln im vollkommenen Einklang (1 : 1), so erblickt man eine Ellipse, deren Form von dem Phasenunterschied beider Gabeln abhängt. Bei der Phasendifferenz 0, $\frac{1}{2}$ und 1 geht diese Ellipse in eine gerade Lichtlinie über. Beim vollkommenen Einklange der Gabeln behält die ursprüngliche Lichtlinie constant ihre Form und Lage; ist jedoch der genaue Einklang nur im Geringsten gestört, so wird die Ellipse nach und nach alle Formen annehmen, welche den einzelnen Phasenunterschieden entsprechen. Die mit der geringen Verstimmung erfolgenden „Stösse" fallen stets mit der zuerst auftretenden Figur zusammen, so dass sich auch hier leicht die Stöße für die Secunde mit dem Auge ermitteln lassen. Man wird folglich den Unterschied der Töne mit dem Sehorgan beurtheilen und durch die geeigneten Stimmmittel aufheben können.

Fig. 63.



0 $\frac{1}{8}$ $\frac{2}{8}$

Fig. 64.



$\frac{3}{8}$ $\frac{4}{8}$ $\frac{5}{8}$

Fig. 65.



$\frac{6}{8}$ $\frac{7}{8}$ 1

Stehen die Gabeln im Tonverhältnis wie 1 : n oder m : n, so zeigen sich je nach dem Werthe von m und n die verschiedensten jedoch regelmäßig und herrlich anzusehenden Curven, welche Lissajous berechnet hat. Die Zeichnungen 63 bis 65 zeigen einige dieser Figuren für das Tonverhältnis $^1/_2$, d. i. für die Octav, während Fig. 66 bis 68 die Figuren für das Tonverhältniss $^3/_4$, d. i. für die Quart wiedergeben[4]). Die beigesetzten Pfeile

Fig. 65.



Fig. 67.

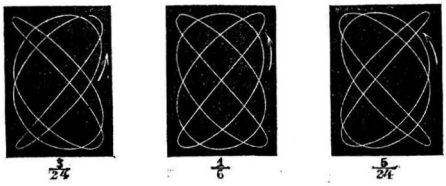


Fig. 68.



deuten die Richtung der Lichtbewegung an. Die unter die Figuren gesetzten Zahlen bezeichnen die Phasenunterschiede.

Auch hier wird man aus der constant bleibenden Form und Lage der Figur auf den reinen Zusammenhang schließen können.

Das Kleinwerden der Figuren beim Abklingen der Gabeln oder ihre Verschiebung wegen Erschütterung der Apparate wird selbstverständlich den Forscher bei Beurtheilung der Beständigkeit der Figuren nicht beirren.

1. Ein gutes Merkmal für die complicierteren Lichtfiguren hat Lissajous angegeben. Für das Intervall $^3/_4$ sieht man z. B. in Fig. 66 bei 0, $^1/_{24}$ oben, oder unten in wagrechter Richtung 3 Scheitel der Curve und in lothrechter Richtung 4 Scheitel. In ähnlicher Weise verhält es sich für das Intervall $^2/_3$, d. h. man hat hier 2 Scheitel wagrecht, 3 Scheitel lothrecht. Die Regel gilt auch für die einfacheren Intervalle, oder, wenn sich die Figur durch Übereinanderlegung der Theile vereinfacht. Im letzteren Falle zählt jeder Scheitel 2 und jedes einfache Ende 1. So z. B. beim Tonverhältnis $^3/_4$, für die Phase $^1/_{12}$ hat man oben rechts einen Scheitel und ein einfaches Ende, folglich $2 + 1 = 3$. In lothrechter Richtung an derselben Figur liegt ein Scheitel zwischen zwei Enden, d. h. $1 + 2 + 1 = 4$. Der gegebenen Regel zufolge ist also die Figur dem Intervall $^3/_4$ zugehörig.

2. Wenn der Einklang gestört ist und die Figuren rasch alle Phasen durchmachen, kann es kommen, dass das letzte Bild auf der Netzhaut noch nicht erloschen ist, während das zweite oder dritte auftritt. Aus der Zahl der gleichzeitig auftretenden Figuren kann man die Dauer des Lichtreizes auf der Netzhaut berechnen.

3. Lissajous hat nicht nur die oben gegebenen Figuren berechnet und eine Theorie derselben gegeben, sondern er hat auch ein Instrument erfunden, mit dem man dieselben in einem Zuge genau zeichnen kann. Die Grundidee der Lissajous'schen Vorstellung von dem Zustandekommen dieser Figuren ist im populären Gewande [5]) folgende: Man denke sich eine einzelne Wellenform einer Tonschrift, welche mit einem Apparat für die rechtwinkelige Combination angefertigt worden ist, sehr vergrößert, und stelle sich vor, diese Zeichnung sei um einen durchsichtigen Cylinder gelegt, dessen Umfang gleich der Breite jener Welle ist. Diese Zeichnung werde aus einer Stellung angesehen, bei welcher die nunmehr kreisförmige Breite der Welle als Gerade erscheint, dann wird sich die zugehörige Schwingungscurve in einer Form zeigen, wie sie bei der optisch-akustischen Methode auf dem weißen Schirm auftritt. Bei nicht vollkommenem Einklange ist es so, als ob jener Cylinder rotieren würde. Hier mögen auch die von König in London ausgestellt gewesenen acht gravierten Glascylinder erwähnt sein, mittelst deren man den theoretischen Ursprung der durch die rechtwinkelige Combination zweier Schwingungen entstehenden Figuren nachzuweisen im Stande ist.

4. Wenn man eine der Stimmgabeln (Fig. 62) oder beide um eine wagrechte Axe drehbar macht, so ist es leicht, ihre Schwingungsebenen unter beliebigen Winkeln gegen einander zu neigen und mannigfache, von den eingehaltenen Bedingungen abhängige Lichtfiguren zu bekommen.

57. *Bemerkungen in praktischer Beziehung.* *a*) Wenn die herrlichen Lichtfiguren bei der optisch-akustischen Methode einer größeren Versammlung vorgeführt werden sollen, kann selbstverständlich nur die projicierende Methode dienen. Das Licht muss dann sehr kräftig, mithin von der Sonne, von einer elektrischen Lampe oder von Hidrooxygengas kommen. Für diesen Fall müssen wegen der bei Glasspiegeln auftretenden kräftigeu Nebenbilder nothwendiger Weise Metallspiegel angewendet werden, und zwar entweder durch Anschleifen der Zinke an der betreffenden Stelle oder durch Festmachung eines eigenen Spiegels. Der Apparat mit Metallspiegeln ist freilich theurer, als mit gläsernen Spiegeln (bei König's Apparat um 200 Francs), aber die Leistung ist eine um so vollkommenere. Auch die nach Liebig's Methode versilberten Glasspiegel ließen sich anwenden. Dieselben haben in optischer Beziehung dieselben Vorzüge wie die Metallspiegel und kommen billiger zu stehen. König meint aber, es sei schwierig, sie so solide zu fassen, als es für die schnelle Bewegung nothwendig sei,

ohne sie abzunützen und er liefert für 400 Francs einen ganz guten Apparat mit Stahlspiegel.

b) Gewöhnliche Glasspiegel taugen mehr für den einzelnen Beobachter unter Anwendung eines schwächeren Lichtes, etwa wie es von der Ölflamme einer Argandlampe kommt. Das Lampenglas wird mit einem Blechcylinder bedeckt, der eine kleine Seiten-Öffnung besitzt, durch welche das Licht auf die Seitenspiegel geleitet wird. Bei großer Schwingungsweite kann man dann die Bilder direct in den Spiegeln ansehen. Sie erfüllen fast die ganze Spiegelebene und sind genügend deutlich, weil das von dem Glase herrührende zweite Bild viel schwächer, als das von der Folie zurückgeworfene ist. Bei geringer Schwingungsweite oder behufs einer genaueren Beobachtung betrachtet man die Erscheinung mit einem Fernrohr.

c) In der Regel zeigen sich die complicierten Figuren deutlicher, als der gerade Strich. Sehr verwickelte Verhältnisse jedoch, wie z. B. $\frac{80}{81}$, $\frac{24}{25}$, $\frac{15}{16}$, $\frac{8}{15}$, $\frac{7}{13}$, treten (wenigstens bei Anwendung von Glasspiegeln) undeutlich auf, und es wird bei diesen die schriftliche Methode (Cap. III) vorzuziehen sein, wenn man ihre Schwingungsformen studieren will.

d) Bei Körpern, welche nicht in Umdrehung versetzt werden können, und bei welchen dennoch die sinoidalen Linien oder Wellencurven einem Publicum sichtlich gemacht werden sollen, lässt man das Lichtbündel von dem Spiegel, welchen sie selbst tragen, auf einen zweiten, rotierenden Spiegel fallen, von von dem endlich das Licht durch eine Sammellinse auf die Auffangtafel geleitet wird. Es versteht sich von selbst, dass der Spiegel in der Schwingungsebene des Lichtstrahles liegen und sich um eine Axe drehen muss, welche senkrecht auf die zurückgeworfenen Strahlen gerichtet ist.

58. Beurtheilung und Anwendung der optisch-akustischen Methode. a) Das optisch-akustische Verfahren verwandelt die akustische Erscheinung in eine optische; es setzt das Auge an die Stelle des Ohres, es lässt, könnte man sagen, den Ton sehen (!). Und da das Hören dabei nicht ausgeschlossen ist, so gestattet diese Methode mit zwei Sinnesorganen wahrzunehmen,

was sonst nur einem Sinne zugewiesen war. Diese Bereicherung im Gebrauche der Sinne kann nicht ohne günstige Folgen sein. In der That hat Lissajous bereits auf diesem Wege einige Fragen beantwortet, welche mit dem Ohre allein nicht zur Entscheidung gebracht werden konnten.

b) Zunächst springt in die Augen, dass jetzt das experimentale Studium der Schwingungsweiten und Phasenzustände tönender fester Körper möglich ist.

c) Das genaue Stimmen von Gabeln lässt sich nunmehr auch mit einem minder gebildeten Ohre zu Stande bringen und ist überhaupt erleichtert. Das Stimmen nach der Scheiblerschen Methode mittelst der Stöße (Cap. VI) wird jedoch bei einem guten, wenn auch in musikalischer Beziehung gänzlich vernachlässigten Gehör stets vorzuziehen sein.

d) Bekanntlich war bisher nicht sichergestellt, ob die „Stöße" zweier Gabeln (nach der Meinung Savart's) von ihrer gegenseitigen Einwirkung oder (nach der Ansicht von Tartini und Sauveur) von dem Aufeinanderwirken der Luftwellen herrühren; die optische Methode entschied zu Gunsten der letzteren Annahme.

e) „Der Resonanzkasten hat auf die Tonhöhe keinen Einfluss" — wurde durch die optische Methode zur Gewissheit gebracht. Die Figuren nämlich bleiben bei der entsprechenden Wegnahme der Stimmkästen und Wiederersatz derselben ungeändert.

f) Die Schwingungsdauer einer Stimmgabel wächst um etwas, wenn ihre Schwingweite zunimmt. Die Schwingungen der nichtkonstanten Lichtfiguren (§. 55, *b*) werden nämlich langsamer, wenn man die höher gestimmte Gabel mit einem Violinbogen ein Weniges streicht und dadurch in stärkere Schwingungen versetzt. Umgekehrt verhält es sich, wenn die tiefere Gabel zu weiteren Excursionen veranlasst und dadurch der Unterschied beider Gabeln vergrößert wird.

g) Wolf[6]) wendet das Lissajous'sche Princip auf die Zungenpfeifen an. Die Schwingungsebenen der Zungen werden senkrecht gegen einander gestellt. Die freien Enden der

Zungen sind silberpoliert oder mit kleinen Spiegelchen versehen. Bei vollkommener Consonanz der betreffenden Töne ruhet die Lichtfigur; bei Störungen der Consonanz rotiert sie nach rechts oder links. — In ähnlicher Weise hat Wolf das von einer einzigen durchschlagenden Zunge reflectierte Bild eines leuchtenden Punctes auf einen rotierenden Spiegel fallen lassen und hier das Bild einer einfachen Sinusoide erhalten. Daraus folgert er:

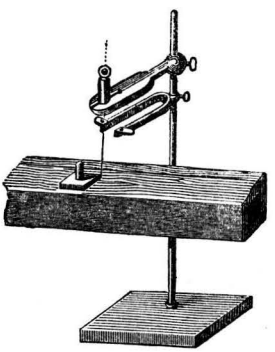
α) Der Schwingungszustand der durchschlagenden Zunge ist ein einfacher.

β) Die Obertöne bei einer Zungenpfeife rühren von den Luftstößen her, welche beim jedesmaligen Öffnen und Schließen des Zungenschlitzes entstehen.

h) Wenn man die Membrane des Scott'schen Phonautographen mit einem Spiegelchen versieht, so erhält die optisch-akustische Methode eine wesentliche Ausdehnung. Noch andere Erweiterungen und Anwendungen derselben sind so wichtig, dass sie im Folgenden eine besondere Besprechung erheischen.

59. Der Comparator von Lissajous. a) Dieser (Fig. 69) dient dazu, die optisch-akustischen Studien zu machen, wenn auch der zu untersuchende Körper nicht geeignet ist, einen Spiegel zu tragen, oder wenn er aus andern Gründen keinen bekommen darf, wie z. B. eine Normalstimmgabel. Der Comparator ist im Wesentlichen ein Mikroskop, dessen Objectiv (Fig. 69) an dem oberen Ende der einen Zinke einer Stimmgabel angebracht, dessen Ocular jedoch fix ist. Der beste Abstand beider lässt sich regeln. Wenn die Stimmgabel, welche das Objectiv hält, zum Tönen gebracht wird, so erfolgen ihre Vibrationen in wagrechter Ebene, also auch die des Objectives und ebenfalls des Bildes von einem richtig eingestellten, gut beleuchteten mikroskopi-

Fig. 69.



schen Gegenstande, etwa des Bildes eines hellen Punctes einer Saite. Das Bild des Objectes wird also alle Schwingungen der Gabel mitmachen. Bringt man aber das Object ebenfalls in Schwingung und zwar nach lothrechter Richtung, so werden eine oder mehrere jener Lichtfiguren im Gesichtsfelde erscheinen, welche wir bei der zusammengesetzten rechtwinkeligen Schwingungsbewegung in zwei verschiedenen Körpern kennen gelernt haben (§. 56). Alles über dieses Thema dort Gesagte gilt auch hier. Dass die mit dem Objectiv versehene Stimmgabel an der zweiten Zinke an einer gleich gelegenen Stelle mit einem gleichgestalteten Gegengewichtchen belastet sein muss, ist von selbst klar.

b) Lissajous hat seinen Comparator besonders zum Stimmen der Saite seines Monochordes und zum Vergleichen von Stimmgabeln mit einer Normalstimmgabel verwendet. Was die Saiten betrifft, so schwärzt er eine Strecke derselben mit Ruß, nimmt hierauf denselben an einem Puncte fort und beleuchtet diesen sehr kräftig. Derselbe bildet dann das Object für den Comparator.

Helmholtz verschafft sich für sein „Vibrations-Mikroskop“ [7]) (welches der Hauptsache nach ein solcher Comparator ist) den leuchtenden Punct, indem er eine Stelle der Saite mit Tinte schwärzt, nachdem sie trocken geworden mit Klebwachs einreibt, etwas Stärkemehl darauf streut und dann so beleuchtet, dass eines der Mehlstäubchen den hellen Punct für das Mikroskop abgibt.

Weil sowohl durch das Berußen, als durch andere ähnliche Methoden der Zustand der Saiten geändert wird, so ist es zweckmäßiger, nach Lissajous den betreffenden Punct der Saite mittelst der Brennlinie einer kleinen Cylinderlinse zu beleuchten, deren Körperaxe der Schwingungsrichtung der Saite parallel liegt. Als Lichtquelle hiefür dient die bereits (§. 57, *b*) besprochene Argandlampe mit undurchsichtigem Cylindermantel, der jedoch eine sehr kleine Lichtöffnung besitzt.

c) Bezüglich der Combination des Grundtones einer Saite und des Tones der Stimmgabel des Comparators verhält sich,

was die auftretenden Lichtfiguren betrifft, Alles wie im §. 56. Hiezu kommt aber noch eine Modification an den Lichtfiguren, wenn sich harmonische Obertöne der Saite hinzugesellen. Dann erscheinen die Linien, welche die Hauptfigur bilden, gezähnt. Ist das Verhältnis der harmonischen Töne zum Grundton ein einfaches, so ruht die gezackte Curve; ist jedoch das Verhältnis ein zusammengesetztes, so läuft die Zahnung um die Hauptfigur. Wenn der harmonische Ton der Saite im Einklange steht mit dem Grundton der Gabel, so bleibt der Zickzack ruhig, aber die Hauptfigur nicht. Ist keiner der Töne der Saite im Einklange mit dem Grundton der Gabel, dann bleiben weder die Hauptfigur noch die Zacken in Ruhe.

Die harmonischen Obertöne der Saite werden am sichersten durch das Schlägen mit einem Lederklöppel (Fig. 17) erregt. Will man den Einklang zwischen den harmonischen Tönen einer Saite und ihrem Grundtone stören, so überbürdet man eine Stelle der Saite oder erhitzt eine kleine Strecke derselben.

Die Dissonanz der harmonischen Obertöne und des Grundtones sind immer ein Zeichen der Ungleichartigkeit im Gefüge der Saiten und die optisch-akustische Methode liefert also ein gutes Mittel, die Homogenität der Saitenstücke zu prüfen.

d) In ähnlicher Weise wie bei den Saiten ist das Verfahren bei einer Normalstimmgabel, welche man selbstverständlich mit einem Spiegel nicht beschweren darf. Die Normalstimmgabel wird (Fig. 69) in eine passende Stellung zum Comparator gebracht und ein Punct oben an einer der Zinken hell beleuchtet. Wenn beide Gabeln schwingen, so zeigen sich eine oder mehrere wechselnde Figuren der rechtwinkeligen Combinationen. Man stellt durch Verschiebung von Ausgleichgewichtchen an der Comparatorgabel Einklang her. Hierauf wird die Normalstimmgabel durch den tönenden Körper ersetzt, welchen man mit ihr vergleichen will. In solcher Weise lassen sich rasch eine große Reihe verkäuflicher Stimmgabeln mit der Musterstimmgabel vergleichen und die schlechten zurückweisen.

In der That vergleicht Lissajous auf diesem Wege alle in Frankreich zu verkaufenden Stimmgabeln mit einer Normal-Stimmgabel von 870 einfachen (halben) Schwingungen in der Secunde. Wenn sie richtig gefunden werden, stempelt man sie unter seiner Aufsicht ab [8]).

Um die Schwingungen der Stimmgabeln länger dauern zu machen, nimmt Lissajous zu dem Princip der Selbstunterbrechung seine Zuflucht. Wir haben dieses Princip bereits (§. 11. u. §. 40, *b*) kennen gelernt. In neuerer Zeit wird von diesem Mittel in der Akustik mehrfach mit dem besten Erfolg Gebrauch gemacht.

60. Geschichtlicher Rückblick bezüglich der optisch-akustischen Methode. Schon im Jahre 1800 hatte Young [9]) einige optisch-akustische Versuche bekannt gemacht, die nicht verfehlten, in wissenschaftlichen Kreisen Aufsehen zu erregen. Er leitete im Finstern auf den Silberdraht, womit eine starke Saite übersponnen war, einen kräftigen Lichtstrahl der Sonne, beobachtete die beim Schwingen auftretenden Lichtcurven mit einem Mikroskope und gab eine Reihe von Abbildungen dieser Curven, welche er einer mathematischen Behandlung fähig erachtete. Ähnliche Versuche hatte jedoch schon vor ihm Busse (in dessen Beiträgen zur Mathematik und Physik) und Chladni gegeben.

Diese Arbeiten führten etwas später (1827) Wheatstone [10]) auf das bekannte Kaleidophon, akustische oder phonische Kaleidoskop. Bei diesem reflectieren an den oberen, freien Enden schwingender Metallstäbe kleine Kugelspiegel das Licht in Form schöner Curven. Im Innern folierte Glasperlen geben die Mignon-Kugelspiegel ab. Dieselben sind an einigen Stäben, um die Lichterscheinung prächtiger zu machen, auch hie und da mit glänzenden Farbenpuncten versehen; sie sind ferner an anderen Stäben symmetrisch auf kleinen schwarzen Brettchen angebracht, welche in verschiedenen Neigungen an dem freien Ende der Stäbe sich befestigen lassen.

Die Erscheinung zeigt sich selbstverständlich am schönsten im Dunkeln, wenn Sonnenstrahlen auf die Knöpfchen geleitet werden, — indessen bleibt das Ganze in dieser Form eine

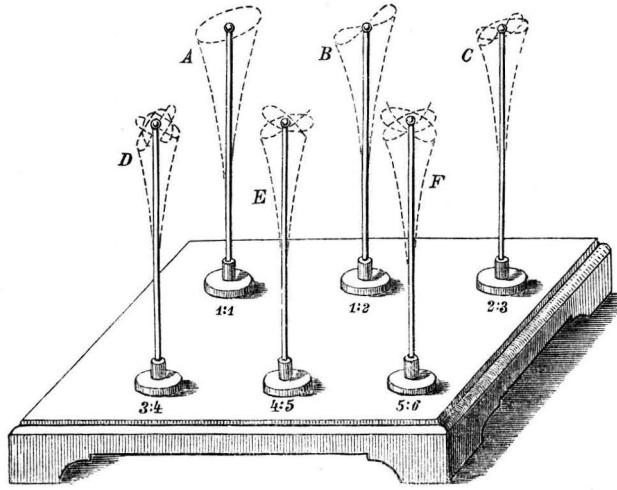
Spielerei, wobei mich nur wundert, dass man das Unterhaltende der Erscheinung nicht dadurch gesteigert hat, die Stäbe innerhalb eines veränderlichen Winkels, den zwei Planspiegel mit einander bilden, schwingen zu lassen. Die Verbindung des Kaleidophons mit dem Kaleidoskop müsste die Augenweide (worauf es hier hauptsächlich abgesehen war) jedenfalls sehr erhöhen. Lissajous nahm das von Busse, Chladni, Young und Wheatstone behandelte Thema wieder auf und führte es einer glücklichen Lösung zu.

61. Ein Kaleidophon von wissenschaftlichem Werthe. *a*) Indessen hatte schon früher Wheatstone dem Kaleidophon ein ernsteres Ziel gesetzt. Wohl abgestimmte Stäbe (Fig. 70) tragen am oberen, freien Ende kleine glänzende Metallkugeln. Je nach der Abstimmung der Stäbe geben jene Kugelspiegel die Lichtcurven, welche man bei der rechtwinkeligen Composition nach der optisch-akustischen Methode von Lissajous wahrnimmt. Nur der für elliptische Lichtfiguren bestimmte Stab 1 : 1 ist von kreisrundem, die anderen Stäbe sind alle von rechteckigem Querschnitte. Auch eine Tonschrift von ihnen abgenommen, stimmt mit den Phonogrammen, welche man bei entsprechender rechtwinkeliger Combination der Töne mittelst des in §. 37 besprochenen Apparates erhält. König hatte auch ein solches Kaleidophon ausgestellt. Dieses Instrument leistet zweierlei:

1. Zeigt es in unzweifelhafter Weise, dass in einem Stabe rechtwinkelige combinierte Schwingungen vorhanden sind, und gibt durch die Tonschrift und durch die Lichtfiguren auch an, in welchem Zahlen- und Phasenverhältnisse diese Schwingungen zu einander stehen.

2. Bietet es Lehranstalten, welche sich die Combinations-Apparate wegen beschränkter Geldmittel nicht anzuschaffen im Stande sind, Gelegenheit, ihren Schülern dennoch die Lissajous'schen Lichtfiguren (Fig. 63 bis 68) vorzuführen und (in einem und demselben Körper) senkrecht combinierte Tonschriften anzufertigen (Fig. 28).

Fig. 70.



Dazu kommt noch, dass die Knöpfchen schon im gewöhnlichen Tageslichte, ohne besondere Vorbereitung, die hübschen Lichtcurven geben, sobald man die dünnen Stäbchen, d. i. ihre Träger, oben nur etwas nach der Seite biegt und dann schwingen lässt. Dass die Figuren noch schöner auftreten, wenn die kleinen Kugelspiegel im Dunkeln kräftig beleuchtet werden, versteht sich von selbst.

König's Kaleidophon besteht gewöhnlich aus sechs Stäben, welche auf einem gemeinschaftlichen rechteckigen Fußbrettchen angeschraubt sind.

Wenn man die Stäbe am oberen Ende etwas weit aus der Ruhelage bringt, und zwar bei jenen mit rechtwinkeligem Querschnitt nach der Richtung der Diagonale, so geben sie Figuren, welche folgenden (zwischen die Klammern gesetzten) Tonverhältnissen entsprechen (Fig. 70):

Stab *A* (1 : 1). Stab *B* (1 : 2). Stab *C* (2 : 3).
Stab *D* (3 : 4). Stab *E* (4 : 5). Stab *F* (5 : 6).

1. Diese Tonverhältnisse sind sowohl auf der messingenen Basis der Stäbe als auch auf dem für sie bestimmten Fußbrette angegeben (Fig. 70), so dass die Zusammenstellung des Apparates keine Schwierigkeiten bietet.

2. Folgendes sind die Dimensionen der Stäbe des in meinem Cabinette befindlichen Kaleidophons (Fig. 70):

Stab	*A*	„Höhe“	(1 : 1)	27·4cm,	Durchmesser	0·223cm,	Umfang	0·7cm
„	*B*	„	(1 : 2)	27·5cm,	1. Dimension	0·4cm,	2. Dimension	0·2cm
„	*C*	„	(2 : 3)	27·55cm,	„	0·3cm,	„	0·2cm
„	*D*	„	(3 : 4)	27·4cm,	„	0·3cm,	„	0·25cm
„	*E*	„	(4 : 5)	27·5cm,	„	0·3cm,	„	0·275cm
„	*F*	„	(5 : 6)	27·55cm,	„	0·3cm,	„	0·25cm.

Bei allen am oberen Ende befestigten Kugelspiegeln ist der Durchmesser 0·475 Cm. — Die „Höhe“ oder Länge der Stäbe ist nur bis zum Knopf genommen.

3. Die Stäbe sind aus Stahl; die Kugelspiegel aus einem weißen Metallgemisch, das auch versilbert werden kann.

b) König liefert auch einen einzigen, mit Feilstrichen als Marken versehenen Stab, welcher einen kleinen Kugelspiegel an dem einen Ende trägt. Bei je einem anderen der gefeilten Zeichen eingespannt (etwa in einem Schraubstock), gibt ein solcher Stab, wenn er schwingt, eine andere Lissajous'sche Lichtfigur, also andere rechtwinkelige Combinationen. Dieses einfachste Kaleidophon, dieser „kaleidophonische Universalstab“ (so könnte man ihn bezeichnen), empfiehlt sich besonders für mittellose Lehranstalten. — Ein einziger Stab bietet ihnen Gelegenheit zu einer Fülle von eben so wichtigen, lehrreichen, als unterhaltenden Versuchen. Die Tonschriften von Kaleidophon-Stäben hatte König in der fünften Abtheilung seines trefflichen Albums niedergelegt (§. 50; vergl. auch Fig. 28).

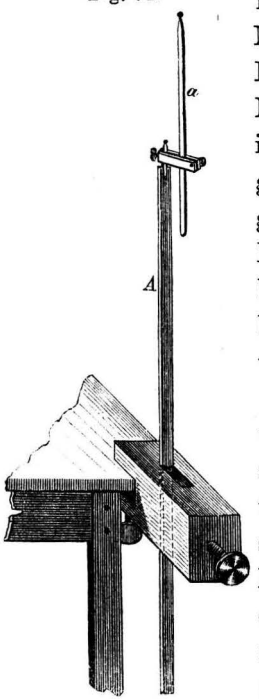
c) Wenn man einen kaleidophonischen Stab am oberen Ende mit einem metallischen Planspiegelchen versieht, so kann der Stab sehr wohl dazu dienen, die Figuren, welche er mittelst des Kugelspiegels nur subjectiv gegeben hat, nunmehr auch objectiv an eine weiße Wand zu zeichnen. Man hat so ein einfaches Mittel, die Lissajous'schen akustischen Lichtfiguren einem großen Publicum vorzuführen.

Beabsichtigt man eine objective Darstellung der kaleidophonischen Lichtfiguren, dann ist es am besten, das obere Ende der Stäbe mit einer Schraube zu versehen, um daselbst je nach Bedürfnis die Kugel- oder Planspiegelchen fest zu machen.

62. Näheres über die Entstehung der kaleidophonischen Lichtfiguren. Fassen wir einen der kaleidophonischen Stäbe mit rechteckigem Querschnitt in's Auge. Wir können uns vorläufig denken, dieser Stab bestehe aus zwei dünnen Stahl-Lamellen, welche unter rechten Winkeln an einander stoßen. Nennen wir die breitere Lamelle A (d. i. jene mit der größeren Dimension in der Basis) und die schmälere a (d. i. die mit der kleineren Dimension des Querschnittes). Stellen wir uns vor, man könnte die Lamelle A für sich allein, und zwar so zum Schwingen bringen, dass sie sich wie ein Pendel um ihre Ruhelage bewegt, so wird die durch die scheitelrechte Axe (Längenaxe) von A und senkrecht zu ihrer breiten Fläche gelegte Ebene E die Schwingungsebene dieser Lamelle vorstellen. Diesen Schwingungen würde ein gewisser Ton entsprechen. In ähnlicher Weise möchte es sich mit den zur Lamelle a gehörigen Schwingungen und dem entsprechenden Ton verhalten. Die Schwingungsebene e wäre auch hier jene Ebene, die man sich lothrecht durch die Axe (Längenaxe) von e und senkrecht zu ihrer Breite gelegt denkt. Beim kaleidophonischen Stab nun finden wir die soeben gemachten Bedingungen vereinigt. Bringt man denselben vorsichtig so in Schwingung, dass er nur in der Ebene E um die Ruhelage A sich bewegt, so hört man bloß den zur Lamelle A gehörigen Ton. In gleicher Weise lässt sich nur jener Ton vernehmen, welcher der Lamelle a eigen ist, wenn der ganze Stab um die Ruhelage a schwingt. Bringt man jedoch den Stab in der Richtung der Diagonale aus der Ruhelage, so macht er jene Schwingungen, welche der rechtwinkeligen Combination beider Schwingungsarten entspricht, und die Lichtfigur am oberen Spiegel zeigt sich dann identisch mit der Lissajous'schen Figur bei der senkrechten Composition für die gleichwerthigen Tonverhältnisse.

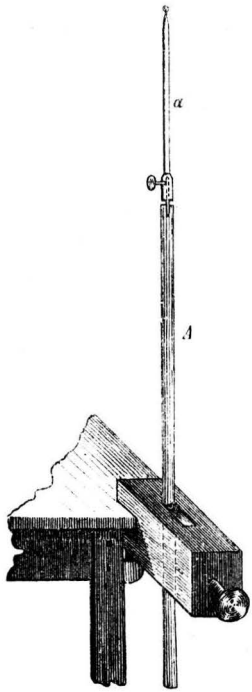
63. Melde's Universal-Kaleidophon. *a*) Das im Vorigen von uns angestellte Gedanken-Experiment hat (1862) der unermüdliche Forscher auf akustischem Gebiet, Melde[11]), bei seinem „Universal-Kaleidophon" (Fig. 71) verwirklicht. Man findet hier die Lamellen *A* und *a* in der That getrennt und mit ihren Schwingungsebenen unter einem rechten Winkel gegen einander gestellt. Das gegenseitige Längen-, also auch das Tonverhältnis der beiden Lamellen kann durch Verschiebung derselben in ihren Hältern geregelt werden. Bringt man jede der Lamellen für sich allein, d. i. in getrennten Zeiten, derart in Schwingung, dass ihre Breite senkrecht zur Schwingungsebene gerichtet ist, so ergeben sich die gewöhnlichen stehenden Schwingungen eines an einem Ende befestigten, vibrierenden Stabes. Werden hingegen beide Lamellen gleichzeitig in Schwingungen dergestalt versetzt, dass ihre Breite mit der zugehörigen Ebene der Schwingung einen rechten Winkel bildet, so entstehen die Lissajous'schen Lichtcurven, deren Form von dem Tonverhältnisse der beiden Lamellen (1 : 1, 1 : 2, 2 : 3, 3 : 4, 4 : 5, 5 : 6 . . . .) abhängt.

Fig. 71.



b) Wenn man eine Zwinge, welche die Lamelle *a* festhält, um eine lothrechte Axe, d. i. im Azimuth dreht, kann man den von beiden Lamellen *A* und *a* gebildeten Winkel mannigfach und also auch die entsprechende Combinations-Figur abändern. Melde hat in solch einfacher Weise die Lissajous'schen Studien erweitert[12]) und die nach einem sicher führenden Schema construirten Figuren in einem Atlas[13]) veröffentlicht.

Fig. 72.



c) Will man die geradlinigen Componenten der Lissajous'schen Lichtfiguren durch elliptische Componenten ersetzen, so vertauscht man die flachen (rechtwinkeligen) Lamellen mit cylindrischen Stäben.

d) Beabsichtigt man das Längenverhältnis der Lamellen nur durch Verschiebung der Lamelle *A* abzuändern, so kann man (Fig. 72) die kleinere Lamelle *a* unmittelbar über der größeren befestigen und um eine lothrechte, auf der größeren Lamelle *A* befindlichen Axe drehbar einrichten.

1. Für die Composition einer geradlinigen Componente mit einer elliptischen klemmt man nur für je eine Lamelle (*A* oder *a*) ein cylinderisches Stäbchen ein; für die Combination zweier elliptischer Componenten wählt man statt beider Lamellen cylindrische Stäbchen.

2. Der Mechaniker Schubert in Marburg hat zuerst ein solches „Universalkaleidophon" nach Melde's Angabe verfertigt.

e) Will man bei unveränderlichem Winkel (45°, 90°) der beiden Lamellen *A* und *a* und bei unveränderlicher Länge der kleineren Lamelle zusammengesetzte Lichtfiguren erzeugen, so kann man dieselben in einfachster Weise so anfertigen, dass die Breite der oberen Lamelle unmittelbar mit der Breite der unteren Lamelle den fraglichen Winkel bildet. Man erreicht dies (unter anderen Methoden) dadurch, wenn der obere Theil einer Lamelle mittelst einer Zange so gedreht wird, dass der gewünschte Winkel beider Lamellenbreiten hervortritt.

Man kann auch ein Stäbchen so hämmern, dass ihre Breiten den gesuchten Winkel mit einander machen.

f) Es leuchtet ein, dass man an der Lamelle *a* wieder eine 3. a_1, an diese eine 4. Lamelle a_2 unter ähnlichen Bedingungen befestigen kann, wie die Lamelle *a* an die Lamelle *A*..., dass

man also mehr als zwei Schwingungsarten unter beliebigen Winkeln zusammensetzen kann, wo dann das oberste Kugelspiegelchen die entsprechende Lichtfigur geben wird.

g) Mit dem „Universal-Kaleidophon" (Fig. 71) von Melde kann man also in sehr einfacher Weise zeigen:

1. Die Combination von zwei oder mehreren geradlinigen Schwingungsbewegungen, welche unter beliebigem Winkel gegen einander geneigt sind.

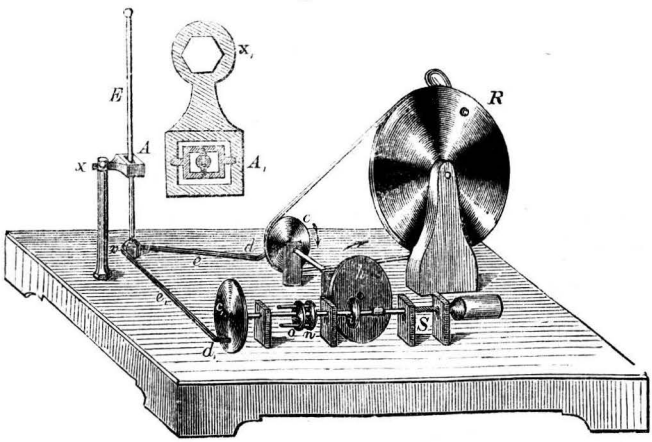
2. Schwingungscurven, welche der Composition einer geradlinigen und einer elliptischen Schwingungsbewegung entsprechen.

3. Schwingungscurven, welche aus zwei elliptischen Vibrations-Bewegungen hervorgehen.

63. Wheatstone's Apparat zur Hervorbringung der kaleidophonischen Lichtfiguren auf mechanischem Wege; angefertigt von König.

a) Princip des Apparates. Die Curven des Wheatston'schen Kaleidophons sind bereits berechnet worden. Auch hat Wheatstone einen kleinen Apparat angefertigt, mit dem man diese Curven auf mechanischem Wege hervorrufen

Fig. 73.



kann. König hat neuestens einen solchen Apparat construiert. Im Wesentlichen wird bei demselben (Fig. 73) ein Stäbchen *E*

zu zwei aufeinander senkrechte Bewegungen e und e_1 angeregt. Der obere Theil des Stäbchens E, welches die resultierende Bewegung macht, trägt einen kleinen Kugelspiegel, welcher die entsprechende Curve beschreibt. Hiermit ist das Wesentlichste des Apparates gegeben. Nun mögen einige nähere Andeutungen folgen: Das Stäbchen E ist in seiner Mitte mittelst einer Cardan'schen Vorrichtung A aufgehängt; es kann daher leicht nach allen Seiten bewegt werden.

An seinem unteren Ende trägt das Stäbchen E zwei senkrecht gegen einander gerichtete Stäbchen e und e_1. Jedes derselben vermag den nach jeder Seite leicht beweglich aufgehängten Stab E nach seiner Richtung hin zu ziehen.

Die dirigierenden Stäbchen e und e_1 sind mit kreisrunden Scheiben c und c_1 excentrisch in einer Weise verbunden, dass sie durch die rotierenden Scheiben c und c_1 in eine hin- und hergehende Bewegung versetzt werden können. Und da die Scheiben c und c_1 derart eingerichtet sind, dass man ihre Umlaufsgeschwindigkeit im Verhältnisse wie 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, u. s. w., also auch die hin- und hergehende Bewegung der dirigierenden Stäbchen im selben Verhältnisse regulieren kann, so sieht man, wie die Figuren des Spiegels an jenem Stäbchen E, welches die Curven des Kaleidophons geben soll, für verschiedene Tonhöhen-Verhältnisse hervorgerufen werden.

Mannigfache Phasenunterschiede bewirkt man durch Umstellung eines der excentrischen Räder.

b) Detail-Beschreibung des Wheatstone'schen mechanischen-kaleidoskopischen Apparates.

α) Es ist leicht zu sehen, dass alle Bewegungen an Wheatstone's mechanisch-kaleidophonischem Apparate (Fig. 73) vom Rade R ausgehen. Bei Umdrehung dieses Rades geräth nämlich durch Übertragung mittelst einer Schnur die kleine Scheibe c in Rotation. Vermöge des an der Scheibe c excentrisch festgemachten Stiftes d wird dann das Stäbchen e in eine hin- und hergehende Bewegung versetzt.

Am zweiten Ende der Drehaxe der Scheibe *c* befindet sich eine kreisrunde Scheibe *h*, welche bei ihrem Umlaufe, vermöge der Reibung, das Rädchen *i* und damit auch die kleine Scheibe c_1 in Umlauf, und wegen des excentrischen Stiftes d_1 das Stäbchen e_1 in eine hin- und hergehende Bewegung bringt. In Folge der oscillierenden Bewegungen von *e* und e_1 kommt das am unteren Ende damit verbundene Stäbchen *E* in die componierte, kaleidophonische Bewegung.

Mittelst der Schraube *S* kann man die Scheibe *i* an der Scheibe *h* von der Peripherie der letzteren bis zu ihrem Centrum verschieben und dadurch die Verhältnisse zwischen den Umlaufszahlen der Scheibchen *c* und c_1 variiren. Diese Abänderungen in den Verhältnissen werden dann selbstverständlich auf die alternierenden Bewegungen der Stäbchen *e* und e_1 übertragen. Man ist dadurch im Stande, die verschiedenen Tonverhältnisse nachzuahmen und die entsprechenden kaleidophonischen Figuren an dem oben befestigten kugelförmigen Spiegel mechanisch zu bewirken.

1. Berührt die Scheibe *i* das Centrum der Scheibe *h*, so erhält man die geradlinige Bewegung am kaleidophonischen Knopfe; nun lässt man die Scheibe *i* langsam gegen die Peripherie der Scheibe *h* rücken, und kommt dabei auf die oben bezeichneten Bewegungsverhältnisse.

2. Behufs der mannigfachen Abstände, welche das Scheibchen *i* gegen den Mittelpunct der Kreisscheibe *h* annehmen muss, trägt das Scheibchen *n* zwei Stifte, welche in den Löchern des Scheibchens *o* sich verschieben.

β) Um auch die Phasen der Figur abzuändern, hält man die Scheibe *h* fest und dreht das Scheibchen *i* etwas um seine Axe. Dadurch wird auch die relative Lage der beiden excentrischen Stifte *d* und d_1 gegeneinander variirt und folglich ein neues Phasenverhältnis erzeugt.

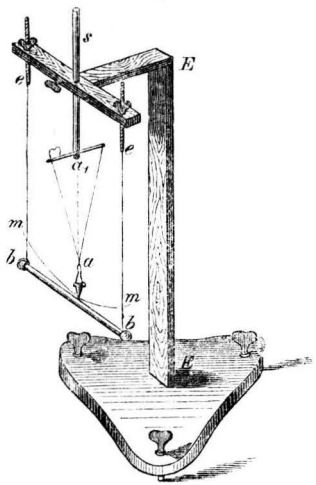
γ) Bei der Übertragung der Bewegung von der Scheibe *h* auf das Scheibchen *i* mittelst der Reibung kann man, obschon ein Verlust an Bewegungsgröße stattfindet, dennoch durch langsame Verschiebung des Rädchens *i* längs des Durchmessers vom Rädchen *h* successive von einer kaleidophonischen Figur zur anderen übergehen. Für bestimmte Inter-

valle mit präcisiertem Gangunterschiede ersetzt König die Scheibchen *i* und *h* durch konische Zahnräder.

Es versteht sich von selbst, dass man die Rotation des Rades *R* auch durch Auslösen einer Feder oder eines Gewichtes oder durch kräftiges Abziehen einer Schnur bewirken könnte. Der Apparat leistet jedoch in seiner einfachen Ausstattung von König alles was zu demonstrieren ist.

64. Eisenlohr's Pendelapparat zur Versinnlichung der kaleidophonischen Lichtfiguren. Auf einfacherem Wege hat Eisenlohr [14]) das Zustandekommen der zusammengesetzten Schwingungsbewegungen mittelst einer Pendelvorrichtung (Fig. 74) versinnlicht. Denkt man sich an dieser Zeichnung das Pendel $a_1 a$ derart schwingen, dass der Punct *a* in der Ebene des Papiers die Grade *mm* (eigentlich den sehr kleinen Bogen *mm*) beschreibt, während gleichzeitig das Pendel *eb* eine zur Papierebene senkrechte Ebene (eigentlich ein sehr kleines Stück einer cylindrischen Mantelfläche) durchmacht, dergestalt, dass der Stab *bb* stets seiner ursprünglichen Lage parallel bleibt, so scheint es dem Auge: als ob der Punct *a* eine Curve zurücklegen würde, welche aus der senkrechten Combination zweier geradliniger Schwingungen hervorgeht. Durch Täuschung des Auges hält nämlich letzteres den Stab *bb* für ruhend und überträgt scheinbar seine Bewegung auf den Knopf *a*, dem nur scheinbar eine resultirende Bewegung der beiden senkrecht gegen einander gerichteten Componenten zukömmt.

Fig. 74.



1. Durch entsprechende Verkürzung oder Verlängerung der beiden Pendel können verschiedene Verhältnisse in den Schwingungszahlen (1 : 1, 1 : 2. 1 : 3 etc.) bewirkt werden. Die Kürzung der Pendel geschieht durch Umwickeln der Aufhängefäden um die Querstäbchen a_1 und *bb*.

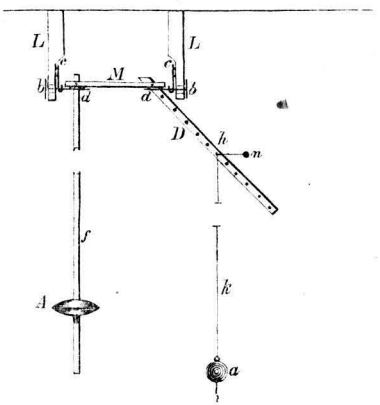
2. Den Punct *a* bringt man dem Stäbchen (ohne Änderung der Pendellängen) näher durch Senken des Stäbchens *s* oder durch Heben des Stäbchens *b b* mittelst der Schrauben *e e*.

3. Wenn man den Stab *s* um seine Längenaxe dreht, kann man den Neigungswinkel der beiden Schwingungen gegen einander abändern.

4. Die Leiste *EE* ist 8′ lang, wornach man die Dimensionen der anderen Theile des Apparates leicht findet.

65. Mos' Pendel-Apparat zur Versinnlichung der kaleidophonischen Lichtfiguren. Eine Vorrichtung, welche die Erscheinung der zusammengesetzten Pendelschwingungen direct gibt, verdanken wir Mos[15]). Wenn das Pendel *A* (Fig. 75) um die wagrechte Axe *bb* senkrecht zur Papierebene schwingt, versetzt es die auf derselben Axe unter einem rechten Winkel befestigte Leiste *D* ebenfalls in Schwingungen, deren Ebene lothrecht liegt. Lässt man nun gleichzeitig das an dem Arm *D* mittelst des Nagels *n* befestigte Pendel *a* in der Ebene des Papiers schwingen, so muss die Kugel *a* die aus beiden senkrecht gegeneinander gerichteten Schwingungen resultirende Bewegung durchmachen und zwar Curven, deren Figur von dem Zahlenverhältnis der entsprechenden Schwingungen, d. i. dem Längenverhältnis beider Pendel und überdies von den Schwingungsphasen abhängig sein wird. Diese Figur kann man von dem unteren Ende des Pendels *a* in irgend einer Weise aufzeichnen lassen.

Fig. 75.



1. Den in Fig. 75 abgebildeten Apparat hat Mos selbst angefertigt. Einem Mechaniker von Fach wird es nicht schwer werden, eine leichte Bewegung der Axe *b b* in einfachster Weise zu ermöglichen, die hier mit Nothbehelfen bewirkt werden musste. Die Spitzen der Axen sind nämlich bei Mos' Apparat (Fig. 75) zwei starke Stopfnadeln *d* und *d*, welche durch Haken an einer hölzernen Querleiste *M* befestigt sind. Diese Stopfnadeln als Enden der Axe ruhen in Lagern *c* und *c*, welche aus umgebogenen, starken Stecknadeln her-

gestellt wurden. Sie reichen überdies in Bohrungen *b* und *b*, die in den lothrechten Leisten *L* und *L* angebracht worden sind. Diese Bohrungen sind aussen mit etwas Kupferblech verschlossen worden.

2. Die Latten *L L* sind an einem wagrechten Querbalken unter rechten Winkeln in einem Abstande von 60cm befestigt. Alle Leisten sind aus leichtem Holze und nur durch Drahtstiften mit einander verbunden.

3. Bei den Versuchen von Mos waren ursprünglich beide Pendel 200cm lang und in der That entsprechen die Figuren am unteren Ende des Pendels *a* einer Ellipse, einer Geraden oder einem Kreise, je nach den Phasen, was auch bei den Lissajous'schen Lichtfiguren und beim Kaleidophon für das Unison-Verhältnis (1 : 1) statt hat.

4. Mos ließ die Länge des Pendels *A* bei 180cm unverändert und kürzte nur das Pendel *a*, und zwar:

für das Verhältnis 3 : 4 bis auf 157cm
„ „ „ 2 : 3 „ „ 124·5cm
„ „ „ 3 : 5 „ „ 100·8cm
„ „ „ 1 : 2 „ „ 70cm

5. Um dem Pendel *a* mehr Schwungkraft zu verleihen, entfernt man es weiter gegen das freie Ende der Latte *D*, welche behufs dessen mit Öffnungen für die Träger des Pendels (ein Nagel) versehen ist.

6. Um die von dem unteren Puncte des Pendels *a* beschriebenen Curven deutlich wahrzunehmen, gibt es verschiedene Mittel:

a) Um die Wandlungen der Ellipse (beim Tonverhältnis 1 : 1) wahrzunehmen, lässt man das Pendel *a* über ein gezeichnetes Kreuz schwingen. Der Durchschnittspunct des Kreuzes wird von dem ruhenden Pendel getroffen.

b) Für complicierte Fälle versieht man die Kugel *a* mit einer Spitze oder mit einem sehr dünnen Pinsel, welche die Figur in irgend einen Staub (Magnesia, Ruß, Mehl, Ruß auf Mehl, auf einer berußten Ebene etc.) einreißt.

7. Sollen die Figuren schön ausfallen, so dürfen die Schwingungs-Amplituden der Pendel nicht groß sein.

V.

Apparate für schwingende Saiten.

66. Phonoskop nach Plassiart, angefertigt von König. Wir haben vorhin ein treffliches, optisch-akustisches Verfahren (§. 59, c) kennen gelernt, die innere Gleichartigkeit einer Saite zu prüfen. Dies ist aber den praktischen Musikern nicht leicht zugänglich. König hat nach Plassiart's Angabe einen sehr einfachen Apparat, „das Phonoskop“ [1]), für diesen Zweck angefertigt und in London ausgestellt.

Den Apparat kann im Wesentlichen jedes längere Brett, an welchem sich mittelst einer Verschiebvorrichtung von einem aufgespannten längeren Saitenstück eine Strecke, wie man sie für die Violine braucht, absondern lässt, abgeben. Dieser Theil wird genau in der Mitte unterstützt. Nun bringt man beide Saitenhälften dieses Stückes gleichzeitig zum Vibrieren. Sind die Töne im Einklang, so ist das der Untersuchung unterworfene Saitenstück rein; hört man aber keinen Einklang, so wird mit dem Schieber weiter gerückt und ein zweites Stück von der gesuchten Länge geprüft.

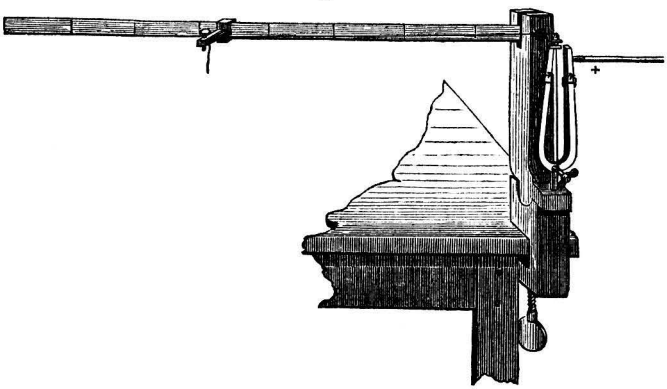
Es dürfte sich endlich bei einer langen Saite ein gutes Stück finden, oder man muss, wenn keine vollkommen homogene Strecke zu entdecken ist, den relativ besten Theil wählen. König hat mit diesem Apparate schon öfter für Violin-Virtuosen die Saiten zu ihrer vollkommenen Zufriedenheit ausgesucht.

Das Instrument erspart also dem Violinisten den Verdruss und Ärger, die ihm aus der Inhomogenität selbst an kürzeren Saitenstücken in nur zu reichem Maße zufließen.

67. Melde's Stimmgabel-Apparat zum Hervorrufen von Schwingungen an fadenförmigen Körpern. a) Wenn man an

einem Seil eine stehende Wellenbewegung erregen will, so befestigt man es bekanntlich an dem einen Ende und bewegt das andere Ende unter Einhaltung einer losen Spannung des Seils mit der Hand regelmäßig auf und ab oder in einem kleinen Kreise herum. Dies Verfahren bietet wegen der Unregelmäßigkeit der Handbewegung schon für Seile einige Schwierigkeiten, noch mehr aber für dünne Fäden und Saiten. Dr. Franz Melde[2]), Privatdocent an der Universität zu Marburg und ein eifriger Forscher auf akustischem Gebiete, hatte den glücklichen Gedanken, das freie Ende fadenförmiger Körper an einem schwingenden Körper zu befestigen und in solcher Weise sicher die regelmäßige Erregung zu bewirken. Verbindet man z. B. nach Melde (Fig. 76) einen Seiden- oder Zwirnfaden mit dem freien Ende einer Stimmgabelzinke und das zweite Ende

Fig. 76.



des Fadens mit einem Schieber, so bilden sich am Faden halbe Wellen mit Knotenpuncten in sehr deutlicher Weise, vorausgesetzt, dass die Gabel tönt und dass man dem Faden durch Versuche jene Spannung ertheilt hat, welche der Tonhöhe der Gabel, d. i. ihrer Schwingungsanzahl entspricht. Die erwähnten stehenden Schwingungen am Faden kommen nämlich durch die Interferenz der directen und zurückgeworfenen (von der Gabel hervorgerufenen) Wellen zu Stande.

Die Gabel lässt sich um ihren Stiel drehen. Je nach der Lage, welche man durch Umdrehung der Stimmgabel ihrer

Axe ertheilt, wirken die Schwingungen in verschiedenen Neigungen gegen die durch den Faden gelegte Vertical-Ebene auf den Faden ein und bewirken an letzterem mannigfache, schöne, stehende Wellensysteme, deren Verschiedenheit noch weiters erhöht wird, wenn man dem Faden verschiedene Lagen gegen die Gabel ertheilt. Man kann behufs dessen den Faden aus seiner horizontalen Lage bis zu einer verticalen dadurch bringen, dass sich der Träger des Fadenwirbels, d. i. die Leiste um eine wagrechte Axe in einem halben Verticalkreise, mithin auch der Faden in ganz gleicher Weise um eine wagrechte Axe drehen lässt.

b) Die Anregung der Stimmgabel zum Tönen geschieht entweder durch Anschlagen mittelst Tampons (Fig. 17), auf elektromagnetischem Wege [3]) (§. 11), oder in sehr regelmäßiger Weise nach Melde mittelst eines „Streichstäbchens", d. i. eines 3 bis 4 Zoll langen Thermometerröhrchens, welches senkrecht an der zweiten Zinke der Gabel so befestigt ist, dass seine Axe in die durch die Axe beider Zinken der Gabel gelegte Ebene fällt. Sobald man dieses gläserne Capillarröhrchen mit gut angenässten Fingern der Länge nach streift, gerathen seine Molecüle in Längenschwingungen, welche an den Grenzstellen des Stäbchens und der Gabelzinke auf letztere als regelmäßige Anregungen wirken und so die Gabel in regelmäßiges Tönen versetzen.

1. Um den Faden zu spannen dient ein am Bogen der Gabel befestigtes messingenes Wirbelchen. — Die Leiste hat, vom Drehpuncte gemessen, die Länge eines Meters und ist auf schwarzem Grunde mittelst weißer Theilstriche in Centimeter eingetheilt. Dadurch ist man im Stande, die angewendeten Fadenlängen zu messen; ferner hat man dadurch gewisse Marken für die Orientierung gewonnen. Die Länge des Fadens wird durch Verschiebung des Reifen bewirkt. Die Tonhöhe des Fadens verändert man theils durch verschiedene Längen, theils verschiedene Spannungen. Diese Tonhöhe wird stets so hergestellt, dass sie in einem einfachen Verhältnisse zum Gabelton steht (1 : 1; 1 : 2...). — Um die Stimmung der Gabel zu variiren, verschiebt man die Stimmreifen (pag. 25). Der Ton der Gabel wird höher, je mehr man die Stimmschieber von den oberen Enden entfernt.

Die Drehung des oberen Theiles des Apparates um eine unterhalb der Stimmgabel befindliche wagrechte Axe würde erst dann nothwendig, wenn man Studien über Spiral-Knotenlinien an schwingenden Saiten machen wollte.

2. Den hier besprochenen Apparat verfertigte zuerst der Mechaniker Schubart in Marburg nach Dr. Melde's Angaben.

3. Die Stimmgabel gibt auch reine Töne und sehr schöne Erscheinungen an dem zugehörigen Faden, wenn die Erregung der Gabel mittelst Tampon geschieht und der Faden einfach durch eine kleine am oberen Ende der linken Zinke angebrachte Öffnung oder durch einen kleinen schmalen Einschnitt geht und mittelst eines Wirbels gespannt wird. Man kann auch den Wirbel am Fuße des ganzen Apparates anbringen. Die Gabel erscheint dann, bis auf die Stimmschieber und den eingelegten Faden, von allen Zugaben befreit. Selbst die Stimmschieber können für einfachere, oder auf einen bestimmten Ton beschränkte Versuche wegbleiben.

4. An nicht reich dotierten Lehranstalten kann auch ohne oben beschriebenen Apparat (Fig. 76) Melde's schöner Grundversuch den Schülern vorgeführt werden. Es genügt, an dem einen freien Ende der Stimmgabel mit einem Stückchen Klebwachs einen Seidenfaden zu befestigen, und das andere Ende des Fadens mit einem Retortenhälter, einem Stativ u. dgl. m. zu verbinden.

Man sucht dann die passendste Entfernung des letztern von der aufgestellten tönenden Stimmgabel, d. h. man tatonniert bezüglich der besten Länge des Fadens und seiner Spannung zu dem hervorgerufenen Stimmgabelton. Man kommt bald zu einem guten Resultat. Die Stimmgabel wird durch Anschlagen mit einem Korkklüppel oder durch Streichen mit einem Contrebassbogen zum Vibrieren gebracht.

c) Die Schwingungsebene der Gabel kann mit der Länge des Fadens zusammenfallen (Fig. 76). Dies ist nach Melde die „Parallelstellung der Gabel (die *P*-Stellung)".

Dreht man jetzt den Stiel der Gabel um einen rechten Winkel, so ergibt sich die Transversalstellung der Gabel (die *T*-Stellung), welche folglich senkrecht zur *P*-Stellung liegt. Die Mittellage der Gabel zwischen beiden heißt die „Mittelstellung der Gabel (die *M*-Stellung)".

Jede dieser Lagen der Gabel kann mit einer horizontalen Lage (L_h), mit einer verticalen Lage (L_v) oder einer schiefen Lage (L_m) des Fadens, bei verschiedener Spannung des letzteren combienirt werden. Melde hat nun alle diese Fälle eingehend erörtert[4]).

d) Die Gabel (Fig. 76) schwingt so, dass der an ihr befindliche Befestigungspunct des Fadens in einem schief gegen den Horizont gerichteten kleinen Bogen sich bewegt. Dieser kleine, bogenförmige, als geradlinig angenommene Weg (Bogenelement) lässt sich in eine wagrechte und in eine lothrechte Componente zerlegen, welche beide mit der Schwingungsebene der Gabel zusammenfallen. Die horizontale Seitenkraft wirkt nur bei der *P*-Stellung der Gabel (Fig. 76), auf den wagrecht liegenden Faden (L_h) in langitudinaler Richtung ein, während die verticale Componente denselben Faden in transversale Schwingungen zu versetzen sucht. Bei der transversalen Stellung (*T*-Stellung) der Gabel und wagrechter Lage (L_h-Lage) des Fadens wirken beide Componenten im transversalen Sinne hinsichtlich der Schwingungen des Fadens. Bei beliebiger Stellung der Gabel gegen die lothrechte Lage (L_v), des Fadens wirkt die horizontale Seitenkraft transversal, die lothrechte aber longitudinal.

Bei den mittleren oder schiefen Lagen der Gabel und des Fadens aber zerlegt man beide Componenten weiter, bis die neuen Seitenkräfte den Faden treffen, wo man nach dem bisherigen leicht die Wirkungsweise beurtheilt.

Der Bogen, welchen der Befestigungspunct des Fadens an der Gabel beschreibt, lässt sich nahezu als ein elliptischer ansehen; folglich wird bei der Zerlegung dieses Weges (für die parallele Stellung der Gabel und wagrechte Lage des Fadens) die grosse Axe dieser Ellipse der wagrechten, die kleine Axe derselben der lothrechten Componente gleich sein. Wir sehen also, dass die wagrechte Seitenkraft größer sein wird als die lothrechte.

Nach Melde's Studien sind bei derselben Spannung des Fadens die von der transversal wirkenden Componente herrührenden Schwingungen des Fadens doppelt so schnell als jene, welche von der longitudinal erregenden Componente erzeugt werden. Sie betragen also 2 *n*, wenn letztere *n* ausmachen. Wenn nun beide Componenten gleichzeitig und rechtwinklig combinirt auf den Faden wirken, so beschreibt letzterer beim Schwingen eine krumme Fläche, welche senkrecht zur Ruhelage des Fadens durchschnitten, eine Curve gibt, wie

sie der senkrechten Combination für Schwingungen zukommt, deren Zahlen sich wie 1 : 2 verhalten (Fig. 63). Die Versuche nach Melde lehren, dass diese Curven nur bei der mittleren Stellung (*M*-Stellung) der Gabel und wagrechten Lage (L_h) des Fadens oder bei beliebiger Stellung der Gabel und mittleren Lage (L_m) des Fadens auftreten. In den übrigen Fällen überwiegt die eine Componente die andere so sehr an Größe, dass stets nur die Bewegung auftritt, welche der mächtigeren Componente entspricht.

Durch geringe Abänderungen der Spannungen des Fadens oder durch etwas höhere Stimmung der Gabel mittelst der Stimmschieber verwandeln sich die zur transversalen Erregung gehörigen, ebenen Schwingungen des Fadens in elliptische oder kreisförmige Schwingungen, aus deren Combination sich eine für das Tonverhältnis 1 : 2 genau bestimmte, lange Reihe regelmäßig krummer Schwingungsflächen ergibt. Melde hat die Curven genau wiedergegeben [5]), welche diesen krummen Flächen zu Grunde liegen.

Um diese Curven deutlicher vor das Auge zu bringen, wählte Melde einen schwarzen Faden, welcher an verschiedenen Stellen (von 5cm bis 5cm) mit feinen weißen Puncten versehen worden war. Metallsaiten würden durch die Reflexpuncte von selbst solche Beobachtungspuncte bieten; sie sind aber für diese Versuche zu schwer. Um die ganze Schwingungsfläche einem Publicum zu zeigen, wählt man einen weißen Faden (Seide, Zwirn).

68. Einige einfache Versuche [6]) *mittelst Melde's Stimmgabel-Apparat.* *a*) Wird (Figur 76) die Gabel auf c^1 gestimmt und dann auf irgend eine Weise zum Tönen gebracht (durch Streichröhrchen, Tampon, weiche Klöppel, Haarbogen, Elektromagnet) und ist ihre Stellung parallel zum wagrecht gespannten Faden (*P*-Stellung der Gabel, L_h des Fadens), so schwingt letzterer derart, dass er eine halbe Welle gibt, wenn er den Ton c^0, also die nächst tiefere Octave des Gabeltones vernehmen lässt. Der Faden schwingt dann in Form eines einzigen Bogens um seine ursprüngliche Ruhelage, ohne Knotenpunct. Die Spannung des Fadens, sobald dieser erreicht ist, wollen wir nach Melde mit „erste Spannung“ bezeichnen.

Dieser Fadenton c^0 ist besonders gut hörbar, wenn man sich einer für Violinen bestimmten *e*-Saite bedient.

b) Man kann nun die Spannung des Fadens so lange verringern, bis genau in seiner Mitte ein Knotenpunct entsteht, wenn die Gabel tönt.

Man hat dann 2 halbe Wellen, welche in Summe gleich der Länge des Fadens sind. Der Ton des Fadens ist auch jetzt gleich c^0, folglich wäre bei dieser Spannung der Ton des Fadens c^{-1} oder C, wenn er wie im vorigen Falle ohne Schwingungsknoten schwingen würde. Die jetzt bewirkte kleinere Spannung des Fadens sei mit „zweite Spannung" bezeichnet.

c) Durch noch weitere Herabsetzung der Spannung des Fadens kann man an demselben, $^3/_2$, $^4/_2$, $^5/_2$ .... Wellen, entsprechend mit 2, 3, 4.... Knotenpuncten erzeugen. Die zugehörigen Spannungen des Fadens seien beziehungsweise mit s_{-3}, s_{-4}, s_{-5} .... (3. 4. 5. Spannung) bezeichnet.

1. In solcher Weise ließ sich nach Melde der Ton des Fadens (einer Violin-*e*-Saite) bis zur Abtheilung in 4 halbe Wellen hören, und zwar war er stets $= c^0$.

2. Bei stehenden Wellen an Fäden mit mehr als 6 — 7 Knotenpuncten wird die Zählung derselben schon schwierig.

3. Die Lage der Schwingungsebenen lässt sich bei einem dickeren Faden besser wahrnehmen, als bei dünneren, ferner besser bei stärkeren Spannungen als bei schwächeren.

d) Um also am Faden die Reihe harmonischer Schwingungen hervorzurufen (1, 2, 3, 4 ... n halbe Wellen), muss man den Faden so spannen, dass $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$ . . . . $^1/_n$ seiner Länge denselben Ton vernehmen lässt wie die ganze Fadenstrecke bei der Spannung s_{-1}. Die Spannungen werden dabei immer geringer, weshalb sie mit Recht nach Melde mit negativen Zeigern versehen werden. Das negative Zeichen erinnert an die kleinere Spannung, während die steigende Indexziffer die Ordnung der Spannung und zugleich die Anzahl der halben Wellen angibt.

e) Unter den angegebenen Umständen ist es (§. 67) die longitudinale Componente, welche die Wellen hervorrief. Drehen wir jetzt die Gabel in die Transversal-Stellung

(*T*-Stellung), so wird die transversale Componente zur Wirkung auf den wagrecht liegenden Faden (L_h) kommen. Spannen wir überdies den Faden derart, dass er mit der Stimmgabel unison klingt; so werden wir wahrnehmen, dass er seiner ganzen Länge nach mit einer halben Wellenlänge, ohne Schwingungsknoten schwingt. Diese Spannung ist stärker als jene s_{-1} und sie heisse S_{-1}.

f) Man vermindere nun nach und nach (unter Beibehaltung der Transversalstellung der Gabel und wagrechten Lage des Fadens) die Spannung des Fadens so, dass successive $\frac{2}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{2}$, $\frac{5}{2}$ .... $\frac{n}{2}$ Wellen am Faden auftreten und bezeichne beziehungsweise die Spannungen des Fadens mit S_{-2}, S_{-3}, S_{-4}, S_{-5} .... S_{-n}.

g) Durch jedesmaliges intermittirendes Zurückdrehen der Gabel in die parallele Stellung überzeugt man sich leicht durch die auftretende Wellenanzahl und die zugehörigen Töne, dass

die Spannung s_{-1} = der Spannung S_{-2} ist,
„ „ s_{-2} = „ „ S_{-4} „
„ „ s_{-3} = „ „ S_{-6} „
„ „ s_{-4} = „ „ S_{-8} „
„ „ s_{-n} = „ „ S_{-2n} „

h) Daraus folgt aber der oben (§. 67) ausgesprochene Satz: Die von der transversalen Componente herrührenden Schwingungen des Fadens treten bei gleicher Spannung in zweimal größerer Anzahl auf, als die von der longitudinalen Seitenkraft erregten Schwingungen.

i) Wir haben gesehen, dass die Parallel-Stellung der Gabel die von der longitudinal wirkenden Componente herrührenden Schwingungen begünstigt. Melde begann seine Versuche bei dieser Stellung der Gabel und bei wagrechter Lage des Fadens für die Spannungen des Fadens, welche wir mit s_{-1}, s_{-2}, s_{-3} .... s_{-n} bezeichnet haben. Er fand aber, dass über der 1. Spannung noch eine andere liegt, welche ebenfalls eine halbe Wellenlänge zuließ, die der ganzen Fadenstrecke gleich war.

Zwischen der 1. und 2. Spannung ergab sich ihm noch eine andere Spannung mit drei halben Wellen für den ganzen Faden.

Zwischen der 2. und 3. Spannung fand er eine Spannung mit fünf halben Wellen für die ganze Fadenstrecke u. s. w. Die Schwingnngen dieser Spannungen waren aber viel schwächer als die zu s_{-n} gehörigen, und er nannte sie daher „Nebenschwingungen“ und die entsprechenden Spannungen die „Nebenspannungen.“

Im Gegensatze dazu nannte er die mit s_{-n} bezeichneten Spannungen „Hauptspannungen“ und die zugehörigen Schwingungen „Hauptschwingungen.“ Bei seinen weiteren Studien ergab sich aber, dass die Nebenschwingungen nichts anderes sind, als die von der transversal wirkenden Componente herrührenden Schwingungen, und dass es nur günstiger Umstände bedarf, um sie sogar stärker hervortreten zu lassen, als die sogenannten Hauptschwingungen. So z. B. erscheinen sie bei der Transversal-Stellung der Gabel und bei wagrechter Lage des Fadens (*T*-Stellung, L_h) mit gleicher Kraft wie die Hauptschwingungen bei der parallelen Stellung der Gabel unter sonst gleichen Umständen. Bei der *T*-Stellung sind sie eigentlich die Hauptschwingungen. Die bei der parallelen Lage erschienenen Hauptschwingungen fehlen nun gänzlich.

1. Zeigt eine Saite in der Parallelstellung Hauptschwingungen, so erscheinen bei der transversalen Stellung Nebenschwingungen mit zweimal größerer Anzahl halber Wellen.

2. Gibt eine Saite in der Parallelstellung Nebenschwingungen, so erscheinen diese auch in der Transversalstellung, aber diesmal viel kräftiger.

3. Eine Saite mit einer Hauptspannung zeigt bei der Mittelstellung der Gabel die zu den Hauptschwingungen gehörigen Schwingungsabtheilungen und gleichzeitig die doppelte Anzahl der zu den Nebenschwingungen gehörigen Halbwellen.

k) Aus dem Vorgetragenen folgt: Es gibt streng genommen keinen Unterschied zwischen den Haupt- und Nebenschwingungen. In der That hat aueh Melde in seiner „Lehre von den Schwingungen“ diese Eintheilung aufgegeben und dafür substituiert: Schwingungen von der transversalen Com-

ponente herrührend (früher die „Nebenschwingungen“ genannt) und Schwingungen erregt von der longitudinalen Componente (früher als „Hauptschwingungen“ bezeichnet). Die ersteren erfolgen (pag. 133) unter sonst gleichen Umständen doppelt so schnell und aus der Interferenz beider entstehen am Faden (pag. 134) die mannigfachsten krummen Schwingungsflächen, die bei stets geradlinigen Componenten die Lissajous'schen Lichtcurven für das Verhältniss 1 : 2 zur Grundlage haben (Fig. 63 bis 65).

Melde's Studien über die verschiedenen Schwingungsflächen wurden von ihm methodisch nur bei der ersten zur Longitudinal-Componente gehörigen Spannung s_{-1} betrieben, da er sich vorher überzeugt hatte, dass bei einer beliebigen Longitudinal-Spannung s_{-n} keine neuen Thatsachen zum Vorschein kamen.

l) Wir haben bisher eine Gabel vom Tone c^1 vorausgesetzt. Für jede beliebig gestimmte Gabel wird sich leicht die Spannung s_{-1} des Fadens finden, bei welcher er die nächst tiefere Octave zum Gabelton gibt, wenn der Faden seiner ganzen Länge nach schwingt und eine Halbwelle, ohne Knotenpunct, bildet.

Durch weitere Versuche wird man dann auch die Spannung s_{-n} für n stehende Halbwellen ermitteln, unter Beibehaltung des Tones bei der ersten Spannung. Wollte man sodann den Ton berechnen, den der Faden bei der Spannung s_{-n} geben würde, wenn er nur eine Halbwelle bilden, d. i. wenn er seiner ganzen Länge nach schwingen würde, so führt folgender Weg dazu:

Lässt ein schwingender Faden bei den Spannungen

s_{-1}, s_{-2}, s_{-3}, s_{-4}, s_{-5}, s_{-n} denselben

Ton hören, und 1, 2, 3, 4, 5 ... n Halbwellen erscheinen, so wird die relative Schwingungsanzahl dieses Fadens, wenn er seiner ganzen Länge nach, ohne Knotenpuncte, schwingt, beziehungsweise sein:

$$1,\ \tfrac{1}{2},\ \tfrac{1}{3},\ \tfrac{1}{4}\ \tfrac{1}{5}\ \ldots\ldots\ldots \tfrac{1}{n}$$

oder $1,\ \tfrac{1}{2},\ (\tfrac{1}{2}\times\tfrac{2}{3}),\ (\tfrac{1}{2}\times\tfrac{1}{2}),\ (\tfrac{1}{2}\times\tfrac{1}{2}\times\tfrac{4}{5})\ldots.$

oder $1,\ \tfrac{1}{2},\ \tfrac{1}{2}\times\tfrac{2}{3},\ (\tfrac{1}{2})^2,\ (\tfrac{1}{2})^2\times\tfrac{4}{5}\ \ldots.$

d. i. für s_{-2} die nächst tiefere Octave im Vergleiche mit dem Tone bei s_{-1}; für s_{-3} die Octave und eine Quinte tiefer als der Ton bei s_{-1}; für s_{-2} die zweit nächst tiefere Octave des Tones bei s_{-1}. Mit dem Gabelton verglichen, wird dann (nach der Voraussetzung) jeder der genannten Töne um noch eine Octave herabzusetzen sein. — In ähnlicher Weise verhält es sich für die Spannungen S_{-n}, wenn der Faden ohne Knotenpuncte schwingend vorausgesetzt wird.

1. Ist also der Gabelton c^{-1}, dann ist der Fadenton bei $s_{-1} = c^0$, bei $s_{-2} = c^1$, bei $s_{-3} = f^{-1}$, bei $s_{-4} = c^{-2}$, bei $s_{-5} = as^{-2}$, ... vorausgesetzt, dass der Faden ohne Knotenpuncte schwingt.

2. Unter den vorigen Voraussetzungen wäre der Fadenton für $S_{-1} = c^{-1}$, für $S_{-2} = c^0$, für $S_{-3} = f$, für $S_{-4} = c^{-1}$, für $S_{-5} = as^{-1}$.

m) Der Faden vermag sich auch in eine gebrochene Anzahl stehender Halbwellen abzutheilen. Diese treten dann besonders deutlich auf, wenn die transversal wirkende Componente vorherrscht und die Spannung eine unvollkommene ist, also wenn sie zwischen zwei vollkommenen Spannungen S_{-n} und $S_{-(n-1)}$ liegt. Sie werden also erscheinen, wenn der Faden wagrecht liegt und die Gabel die Transversalstellung hat (L_h und T-Stellung) oder bei lothrechtem Faden und beliebiger Stellung der Gabel (L_v und M-Stellung), vorausgesetzt, dass die Spannung zwischen S_{-n} und $S_{-(n-1)}$ liegt.

1. Hat z. B. der wagrechte Faden eine Spannung S_{-3} mit 3 Halbwellen und schreitet man langsam zur Spannung S_{-2} vor, so wird man 2 Halbwellen und einen Bruchtheil einer Halbwelle bekommen, bis endlich bei S_{-2} nur zwei Halbwellen sich bilden. Man kann in solcher Weise $(2 + \frac{3}{4})$, $(2 + \frac{1}{2})$, $(2 + \frac{1}{4})$ Halbwellen am Faden erzeugen. In ähnlicher Weise verhält es sich auch, wenn man von S_{-n} gegen $S_{-(n-1)}$ vorschreitet, man bekommt dann $(n-1)$ Halbwellen und einen Bruchtheil einer Halbwelle. Spannt man stärker als dem S_{-1} entspricht, so erhält man nur einen Bruchtheil der einzigen Halbwelle.

2. Weil bei der wagrechten Lage des Fadens und parallelen Stellung der Gabel (L_h- und P-Stellung) die von der transversalwirkenden Componente herrührenden Halbwellen nur sehr schwach in die Erscheinung treten, so wurden die entsprechenden Knotenpuncte durch die „bekannten Papier-Reiterchen“ bemerklich gemacht. Bei dem Übergehen von einer Spannung zur nächst höhern verrücken sich natürlich auch die Knotenpuncte, also auch die papiernen Merkzeichen. Da nun die Fasern des Fadens die Fortbe-

wegung der Reiterchen hemmten, so hat Melde für solche Versuche eine feine Darmsaite substituiert.

69. Melde's Apparat für das Studium der stehenden Wellen an fadenförmigen Körpern, welche an beiden Enden mit schwingenden Körpern verbunden sind. Spannt man (Fig. 76) das an dem Schieber des Leisten befestigte Ende eines Fadens ebenfalls in die freie Zinke einer zweiten Stimmgabel (siehe die Stimmgabel in Fig. 76), so ergeben sich an beiden Enden des derartig eingeschalteten Fadens wellenerregende Puncte [7]). Man hat dann ein treffliches Mittel Wellenflächen vor das Auge zu bringen, welche durch das gleichzeitige Auftreten von Schwingungsbewegungen in den tönenden Stimmgabeln erzeugt werden.

Der deutlichen Wahrnehmung halber darf jedoch die Ton-Verschiedenheit der erregenden Stimmgabeln nicht zu weit auseinander gehen.

Die Tonverhältnisse 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4; 2 : 3 und 3 : 4 sind dazu am tauglichsten. Die Curven, welche die weißen Puncte des schwarzen Fadens beschreiben, entsprechen den Lichtfiguren bei den Lissajous'schen Studien (§. 56) oder den Lichtlinien am Kaleidophon (§. 61) für das gleichwerthige Tonverhältnis. Wenn man die, zu den Tönen passende Spannung etwas vermindert, oder den Ton einer der Gabeln oder beider etwas erhöht, so kann man auch eine Combination ebener mit elliptischen oder beiderseits elliptischer Wellen hervorrufen, und dadurch die Mannigfaltigkeit der am Faden auftretenden Wellenflächen noch mehr steigern.

1. Die Stimmgabeln können nach Melde auch durch schwingende gerade, und überhaupt durch beliebig geformte tönende Stäbe ersetzt werden.

2. Wenn beide Stimmgabeln nicht vollkommen unison klingen, so werden auch die Stöße in der Wellenbewegung des Fadens ersichtlich.

Treten nun solche Stöße auf, so bewirkt man durch Vorrücken der Stimmschieber oder durch Ankleben von Wachs an den freien Enden der höher tönenden Gabel den vollkommenen Einklang der Gabeln.

70. Ueber den ursprünglichen Versuch Melde's bezüglich der Erregung von stehenden Wellen an fadenförmigen Körpern. *a*) Melde kam auf seine schönen Arbeiten hinsichtlich der Erregung stehender Wellen an fadenförmigen Körpern durch

die Untersuchung der Schwingungen glockenförmiger Flächen. Er spannte nämlich mittelst Siegellacks im Durchmesser der dem Studium unterworfenen Glocke einen dünnen Faden und strich die Glocke 90 Grade von den Aufliegepuncten des Fadens mit einem starken Haarbogen. Der Faden zeigte erst dann schöne stehende Wellen mit Knotenpuncten, als seine Spannung verringert wurde, und zwar traten an jenem Faden um so mehr Wellen auf, je weniger er gespannt erschien. Bei dem ersten Versuche Melde's waren also beide Endpuncte des Fadens gleichzeitig der Erregung unterworfen. Die Erregung der Glocke bewirkte Melde später mittelst eines 3 bis 4 Zoll langen Thermometerröhrchens, welches unterhalb des Glockenrandes, in der verlängerten Richtung des Durchmessers fest gekittet, und mittelst angenässten Fingern der Länge nach gerieben wurde.

1. Um die Spannung zu regeln war die Glocke in einem Holzfuß eingelassen, und letzterer, mit zwei drehbaren, messingenen Ringen versehen. Der eine dieser Reifen hatte ein Häkchen zum Anknüpfen des Fadens, der andere einen Wirbel zum Spannen am zweiten Ende des Fadens.

2. Die Savart'sche Resonanzglocke in den meisten physikalischen Cabinetten ließe sich in solcher Weise leicht für diese Versuche Melde's herrichten. Im Nothfalle kann man die verschiedenen Spannungen mittelst Klebwachs am Rande der Glocke bewirken. Die Spannung des Fadens lockert man durch Streichen zwischen den Fingern.

3. Melde's Glocke war aus Glas, der Durchmesser = 7″, die Höhe = 3″ und Dicke $^3/_4$‴ pariser Maß. Die Glocke muss so gewählt werden, dass sie leicht ihren Grundton mit vier Knotenpuncten gibt. Die Fäden waren aus Seide; von $^1/_{12}$ bis $^5/_{12}$ pariser Linien. Im Allgemeinen genommen sollen die Glocken zu diesen Versuchen von größeren Maßen und mit dünneren Wänden gewählt werden.

b) Melde studierte nun die auftretenden Wellen für verschiedene Spannungen, für verschiedene Stellen zwischen den Knotenpuncten der Glocke [8]), welche letztere er nach seiner und Strehlke's Methode [9]) bestimmte. Er erweiterte auch seine Untersuchungen für nicht diametrale Lagen, also für verschiedene Längen des Fadens und für stumpfe oder scharfe Kanten der Glocken. Die stehenden Wellen an den Fäden traten unter sonst gleichen Umständen, wie zu erwarten war, an den

Stellen der Schwingungsmaxime der Glocke am stärksten, an den Puncten kleinster Schwingungsintensität der Glocke am schwächsten auf. Die Schwingungen erfolgten immer in einer und derselben Ebene, welche verschiedene Lagen annahm, und zwar meistens eine verticale oder horizontale, wenn die Axe der Glocke scheitelrecht stand. Die horizontale Lage der Schwingungsebene entsprach einer stärkeren Spannung des Fadens, oder einer kräftigeren Erregung der Glocke, vorausgesetzt, dass der Faden auf einer stumpfen, d. i. flächenförmigen Stelle des Randes auflag. In entgegengesetzter Weise verhielt es sich, wenn diese Stützstellen des Fadens scharf, also nahezu Puncte waren.

Auch hier fand Melde zwischen den (§. 68) mit s_{-n} bezeichneten Spannungen des Fadens und den zugehörigen stehenden Wellen noch andere durch S_{-n} bezeichnete Spannungen mit entsprechenden, schwächeren Wellen, welche er „Nebenspannungen“ und letztere „Nebenschwingungen“ nannte. Die letzteren sind hier schwieriger zu beobachten und das Gesetz, welches sie befolgen, hat Melde erst mittelst seines oben beschriebenen Stimmgabelapparates gefunden (vergl. §. 67 und 68).

Die scharfen Stützpunkte an der Glocke verschaffte sich Melde dadurch, dass er in den betreffenden Fällen den Rand mit zugeschärften, metallenen Aufsätzen versah.

c) Um den Faden nur an einem Puncte zu erregen, wurde derselbe an einer einzigen Randstelle der Glocke befestigt, das zweite Ende des Fadens aber mit einem nicht in der Glocke liegenden seitwärts befindlichen fixen Puncte irgend eines Stativs verbunden. Der Faden konnte so von größerer Länge als der Glockendurchmesser gewählt werden und daraus ging später der in Fig. 76 abgebildete Apparat hervor, bei welchen die Glocke durch eine Stimmgabel ersetzt wurde. Ursprünglich war jedoch der in Fig. 76 gezeichnete Apparat minder einfach, indem der Faden mit den Radien eines Quadranten zusammenfiel. Man konnte dann dem Faden durch Verschiebung an einem Viertelkreisbogen zwar eine wagrechte, dann lothrechte und endlich auch eine Lage zwischen beiden geben, aber seine Länge war unveränderlich.

Wie Melde später seinen Stimmgabelapparat auch für zwei erregende Puncte umänderte, ist schon im §. 69 vorgetragen worden.

1. Nach Melde können an einem nur wenig gespannten Faden mittelst aus einer kleinen Öffnung (3 bis 4 Linien Durchm.) kommenden Luftzuges stehende Wellen erregt werden, und zwar umsomehr, je geringer die Spannung des Fadens ist.

Der Punct des Fadens, welcher vom Luftstrome getroffen werden soll, liegt beiläufig $\frac{1}{3}$ von dem einen Ende. Diese Stelle wird nach den Umständen veränderlich und durch Tatonnieren aufzusuchen sein.

2. Hat man mittelst des Luftstromes z. B. $\frac{2}{3}$ Wellen erregt, so kann man durch langsames Anspannen des Fadens bald $\frac{3}{2}$ oder $\frac{1}{2}$ Wellenlängen hervorrufen.

d) Zusammenfassung und Rückblick. 1) Bei einer tönenden Stimmgabel (Fig. 76), welche transversal auf einen Faden (Saite etc.) wirkt, erscheinen n Halbwellen, wenn der n^{te} Theil der Fadenlänge mit dem Gabeltone im Einklang steht (§. 68 *e* bis *h*).

2) Erregt die Gabel den Faden longitudinal, so muss letzterer um eine Octave tiefer als jene tönen, wenn n Halbwellen erscheinen sollen (§. 68, *a* bis *d*).

3) Eine Zwischenstellung der Gabel bewirkt die Lissajous'schen Figuren als Durchschnitt der Wellencurven für das Tonverhältnis 1 : 2 (§. 68, *k*).

4) Zwei Stimmgabeln geben mannigfachere Wellencurven mit den entsprechenden Lissajous'schen Figuren als Grundlage. Auch die „Stöße" werden ersichtlich (§. 69).

5) Bei genauerem Tonverhältnis zwischen den Gabeln und der Saite schwingt letztere stets in derselben Ebene, sonst elliptisch (pag. 134 und 140).

VI.

Tönende Stäbe.

71. Stimmgabel-Apparat zum Stimmen nach Scheibler, angefertigt und ausgestellt in London von König. *a*) Das Stimmen musikalischer Instrumente mittelst Stöße — von einem musikalisch völlig ungebildeten Ohr. Wir wissen, dass man zum Stimmen nach Lissajous (§. 59) des Ohres gar nicht bedarf. Indessen wird sich diese Stimm-Methode im gewöhnlichen Leben nie Bahn brechen. Anders ist es bezüglich des Verfahrens nach Scheibler[1]). Hier wird das Stimmen zwar nicht wie bei der optischen Methode vom Hören völlig unabhängig, wol aber vom musikalischen Hören, so dass man mit dem ungebildeten Gehör besser als nach der gewöhnlichen Weise mit dem musikalisch feinsten Ohr stimmen kann. Dass das Stimmen einer ganzen Scale nach einem einzigen Ton, z. B. nach der a^1 = Stimmgabel, selbst beim zartesten und musikalisch geübtesten Ohr nicht genau sein kann, ist klar. Von hundert Musikern werden nach diesem Vorgehen vielleicht nicht zwei eine gleiche Stimmung zu Stande bringen. — Besser ist es bestellt, wenn jeder Ton der Scale mit einem eigenen Musterton „eintönend" (unison), d. i. vollkommen gleich tönend gestimmt wird. Allein hier ist noch immer auch das gebildetste musikalische Gehör Irrungen unterworfen und eine genaue Stimmung unmöglich.

Diese Übelstände waren es, welche Scheibler antrieben, ein vollkommen verlässliches Stimmverfahren aufzusuchen und er fand es in der Anwendung der „Stöße"[2]). Die Stöße empfindet jeder Hörende. Es bedarf dazu keiner besonderen Bildung, keiner eigenen Übung. Dem Unterschiede zweier

Töne entspricht in einer gewissen Zeit, z. B. in der Secunde, eine ganz genau bestimmte Anzahl von Stößen. Unterscheiden sich zwei Töne durch vier Doppel-Schwingungen in der Secunde von einander, und beginnt ihre Bewegung gleichzeitig, so hört man vier Stöße (vergl. §. 18). So lange diese Tondifferenz dauert, so lange bleibt auch die Anzahl der Stöße beständig. Man denke sich jetzt zu jedem Ton der üblichen chromatischen Tonleiter eine Stimmgabel, welche aber um etwas höher oder tiefer als der entsprechende Ton gestimmt ist, und zwar derart, dass sie mit dem vollkommen reinen Tone eine gewisse Anzahl von Stößen, z. B. vier in einer bestimmten Zeit, etwa in der Secunde gebe. Wenn wir jetzt irgend ein Instrument, sei es ein Monochord, eine Pfeife stimmen wollten, so muss der zu regulierende Ton mit der für ihn bestimmten Gabel in der Zeitsecunde genau vier Stöße erzeugen. Ist dies der Fall, so hat das musikalisch völlig ungebildete Ohr noch keine Garantie, den gesuchten Ton gefunden zu haben. An beiden Seiten des zu regulierenden Tones der Stimmgabel gibt es nämlich je einen Ton, der mit dem Stimmgabelton vier Stöße in der Zeitsecunde hervorbringen wird, d. i. einen tieferen und einen höheren. Welcher ist der richtige? Es kann es nur einer sein. Um hierüber in's Klare zu kommen, gibt es zwei Wege:

A. Man verschafft sich für jeden Ton zwei Gabeln, eine etwas tiefere und eine etwas höhere als der gesuchte Ton. Beide Gabeln müssen von dem letzteren um eine gleiche Anzahl von Schwingungen abstehen. Jeder fragliche Ton wird dann mit jeder dieser zwei Gabeln genau die gleiche Anzahl von Stößen in der bestimmten Zeit geben. Ein solches Einschließen des Tones zwischen zwei Grenzen bietet die beste Sicherheit; minder gut für ein gänzlich ungebildetes Gehör wäre je eine Gabel für die Stöße und eine, mit welcher der zu erhaltende Ton unison tönen sollte. Dies würde jedoch für ein akustisch geübtes Ohr eine genügende Controlle sein.

B. Es ist zwar für jeden Ton nur eine Gabel vorhanden, aber man weiß, ob dieser Ton der leitenden Gabel tie-

fer oder höher als der zugehörige Ton der Scale ist — was ein für allemal am hölzernen Stiel der Gabel angemerkt werden mag. Man ruft nun mittelst des zu stimmenden Tones und der zugehörigen Gabel die entsprechende Anzahl von Stößen hervor. — Hierauf werden die entgegengesetzt liegenden Stöße aufgesucht, und aus den dabei nothwendigen Operationen an dem zu stimmenden Instrumente, z. B. ob es bei der zweiten Art die Stöße hervorzurufen nothwendig war, die Saite mehr nachzulassen oder zu spannen, wird man mit Rücksicht auf die Höhe der leitenden Gabel schließen, welcher von beiden Tönen bei gleich vielen Stößen der richtige ist. Da dürfte nun freilich öfter die Operation des Stimmens dreimal durchgemacht werden müssen, während sie bei je zwei Gabeln für einen Ton wie bei dem gewöhnlichen Stimmverfahren bleibt.

Ein feines musikalisches Ohr wird bei der Anwendung einer Gabel für je einen Ton ohne Weiteres den richtigen Ton beurtheilen. Ist z. B. der Ton der Gabel tiefer als der ihm entsprechende Ton der Scale, so stimmt der Tonkenner so lange, bis er neben dem Ton der Gabel einen etwas höheren Ton und die entsprechende Anzahl von Stößen hört. Bei einer Gabel ist es immer besser, eine tiefere zu wählen. In zweifelhaften Fällen müsste der Musiker wie der Nichtkenner der Töne verfahren. Jedenfalls sehen wir aber, dass es Scheibler geglückt ist, das Stimmen auf ein gewöhnliches Hören von Schlägen und auf die gleichzeitige, richtige Beobachtung der Zeit zurückzuführen.

Zum Beobachten der Zeit hiebei dient am besten ein gutes, nicht hörbar schlagendes Metronom oder ein Chronometer. Den Zeitmesser ansehen und die Schläge zählen ist das Wesen dieser Methode, die bisher von keinem andern Verfahren an Richtigkeit und Einfachheit erreicht worden ist. Der geübteste Stimm-Meister nach gewöhnlicher Methode wird von einem für die Musiktöne Tauben übertroffen, wenn dieser nach Scheibler's Vorgehen stimmt.

b) Der in London ausgestellte Scheibler'sche Stimm-Apparat. König hatte solche Scheibler'sche

Stimm-Apparate für Musiker bezüglich der üblichen temperirten chromatischen Tonleiter ausgestellt [3]) und zwar:

1. Drei Reihen von Normal-Stimmgabeln. Je eine Reihe entsprach dem deutschen, französischen und englischen Normal-a^1 und schritt von diesem bis zum a^2 nach der chromatischen Tonleiter und gewöhnlichen akustischen Temperatur vor. Jede Reihe hatte folglich 13 Gabeln. Der Normalstand der Wärme wird für die Gabeln nach Scheibler auf 15 Grad Wärme angenommen. Mit jeder Erhöhung des Wärmezustandes sinkt der Ton etwas, was bei der Anwendung wohl zu beachten ist.

2. Drei Reihen gewöhnlicher Stimmgabeln, um vier Stöße tiefer gestimmt, als der gesuchte Ton, für den alltäglichen Gebrauch bestimmt. Der hohe Werth dieser „Hilfsgabel"-Sammlung für praktische Zwecke kann nicht genug betont werden.

1. Das deutsche Normal-a^1 hat bekanntlich 440 Doppel- oder 880 einfache Schwingungen für die Zeitsecunde. Diese Zahl wurde von der deutschen Naturforscherversammlung zu Stuttgart (1834) auf Antrag Scheibler's angenommen [4]).

2. In England hat das Normal-a^1 444 doppelte oder 888 einfache Schwingungen.

3. In Frankreich entsprechen seit 1859 (Ministerialerlass vom 16. Februar) dem französischen Normal-a^1 435 Doppel-Schwingungen oder 870 einfache Vibrationen. Vor 1859 kamen auf dasselbe für die italienische Oper in Paris 896 einfache Schwingungen, hingegen zur Zeit Ludwig XIV. nur 810 einfache Schwingungen.

4. Die Wiener Oper hat seit 1. November 1862 ebenfalls das französische Normal-a^1 mit 435 doppelten (ganzen) oder 870 einfachen (halben) Schwingungen angenommen.

Wie allerorten hatte auch in Wien das Normal $= a^1$ sich mit der Zeit erhöhet. Noch vor 50 Jahren kamen auf das a^1 Wiener Stimmung im Minimum 840, im Maximum 852 einfache Schwingungen. Nach Scheibler entsprachen in den dreißiger Jahren sechs Wiener Stimmgabeln für den Ton a^1 folgende Zahlen einfacher Schwingungen: $867{\cdot}^{33}$, $872{\cdot}^{67}$, $878{\cdot}^{30}$, $880{\cdot}^{20}$, $880{\cdot}^{67}$ und $889{\cdot}^{74}$. Seit dieser Zeit steigerte man den Ton allmählich bis auf 896 einfache Schwingungen; ja in letzter Zeit hatte er im Minimum 919, im Maximum 920 einfache Schwingungen erreicht.

Fig. 77.

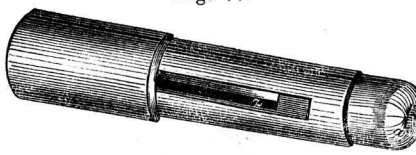
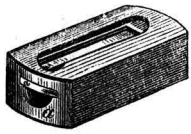


Fig. 78.



Seit Einführung der neuen Stimmung hat Herr Lenoir, Eigenthümer einer Fabrik und einer großartigen Handlung für physikalische Gegenstände, sich mit einem Sortiment der betreffenden Stimmgabeln versehen. Er führt größere Orchester-Stimmgabeln mit starkem Tone, auf einem angemessenen Resonanzkasten befestigt. Zum Anschlagen dient ein aus Tuch dick zusammengerollter und mit Leder überzogener Klöppel (Tampon). Derselbe hat Ähnlichkeit mit dem schon zur Sprache gebrachten Scheibler'schen Schläger und kann auch diesen ganz gut ersetzen. Ferner hat Hr. Lenoir kleinere a^1 — Stimmgabeln mit dem französischen Verificationsstempel und endlich ein sogenanntes Miniatur-Normal-Diaspason (Fig. 77 u. 78), d. i eine sehr kleine Zungenpfeife in elfenbeinener, hölzerner oder papierner Fassung, welche das Normal-a^1 gibt. Das letztere Instrumentchen ist sehr bequem bei Sängerfahrten, da man es selbst in einem Portemonnaie unterbringen kann und überdies der Ton ein sehr starker ist. Interessant sind auch die Aluminium-Stimmgabeln, mit hellem, schönem Klang.

In Russland ist ebenfalls auf Antrag Kupfers das neue, französische Normal-a^1 im Jahre 1862 eingeführt worden. Kupfer schlug ferner vor, eine vergoldete Stimmgabel am Central-Observatorium als „Hauptnormale" zu bewahren und sie etwa alle Jahre mit der Pariser Urnormal-Stimmgabel zu vergleichen. Alle öffentlichen und militärischen Musik-Capellen sollten gehalten sein, nach je zwei Jahren ihre Orchester-Stimmgabel neuerdings am physikalischen Institute prüfen und stimmen zu lassen. Es ist mir nicht bekannt, ob diese Organisation angenommen wird; vorläufig wurden an die kaiserlichen Civil- und Militär-Orchester bei 300 auf Resonanzboden befestigte Stimmgabeln vertheilt.

72. *Scheibler's Tonmesser.* *a*) Scheibler hat auch die „Stöße" angewendet, um nach dem Vorgange von Sauveur (Paris, 1700, für Orgelpfeifen) die Schwingungszahl des Tones *a* genau zu messen [5]). Zu diesem Behufe verschaffte er sich 56 Stimmgabeln, welche von *a* bis a^1 so fortschritten, dass je eine vorhergehende mit der nachfolgenden vier Stöße in der Secunde gab. Die Summe aller dieser Stöße ist gleich dem Unterschiede der doppelten Schwingungszahlen von *a* und a^1 und gleich der Schwingungszahl von *a*, da diese gerade die Hälfte der Schwingungen des a^1 beträgt.

1. In dem gegebenen Falle waren 55 Intervalle mit je vier Stößen, folglich alle Stöße von a bis $a^1 = 55 \times 4 = 220$. Es ist also (wenn wir a und a^1 zugleich für die Werthe der Schwingungszahlen der betreffenden Töne gelten lassen) $a^1 - a = 220$ oder $2a - a = 220$, d. i. $a = 220$ Doppelschwingungen.

2. Weniger mühsam für das Feststellen der Schwingungszahl ist folgender Weg: Es wird a^{-1} nach a^1 mathematisch rein gestimmt, und ebenso c^{-1} und f^{-1} nach a^{-1}. Man hat dann: $f^{-1} = {}^4/_3\ c^{-1} = {}^4/_3 \cdot {}^3/_5\ a^{-1}$ (weil $c^{-1} = {}^3/_5\ a^{-1}$) $= {}^4/_5\ a^{-1} = {}^4/_5 \cdot {}^1/_4\ a^1$ (weil $a^{-1} = {}^1/_4\ a^1$) $= {}^4/_{20}\ a^1$.

Ferner ist $c^{-1} = {}^3/_5\ a^{-1} = {}^3/_5 \cdot {}^1/_4\ a^1$ (weil $a^{-1} = {}^1/_4\ a^1$) $= {}^3/_{20}\ a^1$.

Für $f^{-1} - c^{-1}$ folgt: ${}^4/_{20}\ a^1 - {}^3/_{20}\ a^1 = {}^1/_{20}\ a^1$ oder $20\ (f^{-1} - c^{-1}) = a^1$, d. h.:

Der Unterschied der doppelten Schwingungen oder der „Stöße“ von f^{-1} und c^{-1} zwanzigmal genommen, liefert die Anzahl der doppelten Schwingungen von a^1. — Man hat also nur die Stöße in der Secunde oder in irgend einer passenden Zeit zu zählen, nachdem f^{-1} und c^{-1} gleichzeitig in's Tönen gebracht worden sind, und die erhaltene Zahl mit 20 zu multiplicieren, so ergibt sich die gesuchte Schwingungszahl.

In ähnlicher Weise lassen sich andere Intervalle benützen. Je kleiner dieselben sind, desto leichter die Arbeit — desto bedeutender aber auch der Fehler im Endergebnis, indem der Beobachtungsfehler durch die Multiplication mit dem sich ergebenden Coefficienten n (in unserem oben angenommenen Falle $n = 20$), n mal gesteigert wird.

3. Lissajous hat auf ähnlichem Wege aber nach der optischen Methode die Schwingungszahl des $c^{-1} = 128$ einfachen Schwingungen, des $c^1 = 512$ einfachen Vibrationen gefunden. Die optische Methode kann also ebenfalls zur Bestimmung der absoluten Schwingungszahlen dienen. Und wenn sie nicht so direct die Anzahl der Schwingungen wie das graphische Verfahren liefert, so hat sie im Vergleich mit dem Letzteren den Vorzug, dass bei ihr die Enden der Gabeln frei schwingen, obschon sich der Fehler wegen der Reibung an der Schreibfläche eliminieren lässt (vergl. pag. 56, *c*).

b) Scheibler'scher Tonmesser, angefertigt von König. König hatte nach den Scheibler'schen Grundsätzen einen Tonmesser angefertigt und in London ausgestellt. Derselbe bestand aus 65 Stimmgabeln, welche vom c^1 (mit 256 doppelten oder 512 einfachen Schwingungen) bis zum c^2 (mit 512 doppelten oder 1024 einfachen Schwingungen) so fortschritten, dass je eine mit den beiden angrenzenden vier Stöße gaben. Dieser Tonmesser ist besonders für jene Orgel- und Clavier-Etablissements behufs einer reinen Stimmung von

Nutzen, welche nach verschiedenen Tonleitern arbeiten. Bei einem fixierten Tone jedoch genügt der einfachere Stimm-Apparat.

Man sieht sogleich, dass für die Bestimmung der Schwingungszahl von c^1 (nach dem oben besprochenen pag. 149) folgt $c^2 - c^1 = 256$ Stöße oder $2c^1 - c^1 = 256$ Doppel-Schwingungen, d. i. 512 einfache Vibrationen.

73. Geschichte der Scheibler'schen Erfindung. Beiläufig um das Jahr 1814 wurde Heinrich Scheibler, Seidenhändler in Crefeld, zu seiner schönen Erfindung durch — die Maultrommel veranlasst. Er hatte sich nämlich für seine freien Stunden das Ziel gesetzt, jenes Instrument zu verbessern. Beim Regeln der äußerst feinen Töne dieses zarten Apparates nach dem Monochord fand er, wie unverlässlich selbst ein musikalisch gebildetes Ohr beim Stimmen nach dem reinen Einklang sei.

Da er bald darauf bemerkte, dass die Anzahl der Stöße mit der Tondifferenz zunehme, und die Vermuthung nahe lag, dass dies proportional mit dem Unterschied in der Schwingungszahl geschehe, so war er bemüht, diesen Umstand für eine Stimm-Methode zu benützen, bei welcher nur das gewöhnliche Gehör betheiligt wäre, und welche gleichwol ein untrügliches Resultat geben sollte. Zu diesem Behufe verkürzte er die wohlgestimmte *a*-Saite seines Monochordes um etwas, bis sie mit seiner *a*-Gabel 4 Stöße in der Secunde gab. Die Länge der Saite hiefür wurde an dem Monochord auf das Genaueste angemerkt. Das Zeichen fiel selbstverständlich in die Nähe der Marke für das reine *a*. Wenn dieses Zeichen rechts von der *a*-Marke lag, so wurde jetzt links davon durch Versuche wieder nach einem Puncte geforscht, dem eine Länge der Saite entsprach, bei welcher abermals, wenn die Saite und die *a*-Gabel gleichzeitig zu tönen begannen, vier Stöße in der Secunde zu hören waren. Die Spannung der Saite wurde durch zweckmäßige Einrichtungen bewirkt. Dass sie hierbei stets gleich bleiben musste, ist von selbst klar. Vermittelst der markierten Örter rechts und links vom *a*-Puncte, welche Scheibler „Nebenstellen" des *a* nannte, konnte er die Saite des Monochordes stets ganz genau auf *a* stimmen. Er ertheilte ihr nämlich

eine Spannung, bei welcher die durch jene Nebenstellen bestimmten Saitenlängen in beiden Fällen mit der *a*-Gabel genau vier Stöße in der Secunde machten. Die für *a* abgegrenzte Saite musste dann bei sonst gleichbleibenden Umständen das *a* ganz rein geben, wenn die Nebenstellen und der Zeitmesser verlässlich waren. Ebenso musste jeder andere Ton, der mit den von den Nebenstellen abgeschnittenen Saitenstücken in der Secunde genau vier Stöße hören ließ — das reine *a* sein. In ähnlicher Weise wurden dann auch die Nebenstellen für noch einige Töne versuchsweise bestimmt. Scheibler fand bei dieser mühsamen Arbeit seine Muthmassung bestätigt, dass die Zahl der Stöße dem Unterschiede der erzeugenden Töne proportional sei (§. 18). Auf diese Proportionalität konnte Scheibler auch schließen, weil von drei Gabeln, welche nur um wenige Schwingungen differierten, die höchste und tiefste gerade so viel Stöße erzeugte, als die Summe der Stöße jeder dieser beiden Gabeln mit der mittlern beträgt. Nachdem Scheibler Gewissheit für dieses Gesetz erlangt hatte, konnte er nunmehr den mühevollen Weg des directen Aufsuchens der Nebenstellen verlassen. In der That wurden von jetzt an die Nebenstellen zu den übrigen Tönen der chromatischen Tonleiter berechnet, experimental geprüft, und am Monochordkasten angemerkt. Das Monochord konnte dann dazu dienen, jeden Ton der chromatischen Scala vollkommen rein, nach der Methode der Stöße zu stimmen.

Um eine möglichst reine Stimmung zu erzielen, baute Scheibler ein ausgezeichnetes Monochord mit festem Stand, scharfer Abgrenzung für die Saitenstücke und feiner Scala, deren Theilpuncte nur mittelst einer Loupe wahrnehmbar waren. Später gab er das Monochord gänzlich auf und übertrug sein Princip auf eine Reihe von Stimmgabeln („Hilfsgabeln“). (§. 71.)

Nicht befriedigt mit dem bloß praktischen Nutzen des trefflichen Stimmverfahrens, gieng er nun an die Feststellung der absoluten Schwingungszahlen (§. 72). Dem größeren physikalischen Publicum wurden Scheibler's Arbeiten und Verdienste um die Wissenschaft erst (1834) durch einen trefflichen

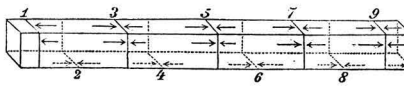
Bericht vom Professor Röber[6]) bekannt, nachdem Professor Munke zuvor eine kurze Anzeige[7]) gegeben hatte. In demselben Jahre veröffentlichte Scheibler selbst eine Schrift über seinen Tonmesser[8]). Sein Name war in der gelehrten Welt bereits so wichtig geworden, dass die von ihm mittelst seines Tonmessers aufgefundene Zahl von 440 Doppelschwingungen in der Secunde für das a^1 von der Naturforscher-Versammlung zu Stuttgart 1834 angenommen wurde (vergl. §. 71). Um seine Erfindung auch außerhalb Deutschland bekannt zu machen, wendete sich Scheibler an mehrere französische Gelehrte, besonders an den Akustiker Savart in Paris.

Scheibler's Arbeiten scheinen in Frankreichs Hauptstadt nicht sogleich die verdiente Würdigung gefunden zu haben; denn im „Bulletin" der französischen wissenschaftlichen Akademie findet man, vom 15. September 1835 datiert, eine Note, in welcher Scheibler an die Berichterstattung erinnert, die ihm bezüglich mehrerer akustischer Druckschriften versprochen sei, welche er der Akademie zur Beurtheilung vorgelegt hatte. Erst später gelangten die hohen Verdienste Scheibler's um die Akustik zur Anerkennung und zwar durch die französischen Gelehrten Lecomte und Vincent und den Pariser Orgelbauer Cavaillé-Coll, so wie durch Wölfel. Die beiden letztern führten die Scheibler'sche Stimmung in ihren Ateliers schon frühzeitig ein. In neuester Zeit, seit König verlässliche Stimmgabeln, sowol für die reine als temperirte Tonleiter liefert, scheint Scheibler's Stimm-Methode in Frankreich einen Aufschwung zu nehmen[9]). Spohr, nachdem er zu Hessen-Kassel ein nach dieser Methode von Scheibler gestimmtes Clavier und eine Orgel auf das genaueste geprüft hatte, äußerte sich, dass man ein Orchester nach der gewöhnlichen Stimmung nicht mehr anhören könnte, wenn man öfter Gelegenheit hätte, Musik zu vernehmen, der die Scheibler'sche Stimmung zu Grunde gelegt worden. Ebenso günstig sprachen sich Newkoman und andere Autoritäten aus. Dass übrigens die Stimmgabeln und das Metronom, wenn die Stimmung wirklich so rein und genau sein soll, auf das sorgfäl-

tigste und richtigste behandelt sein wollen, versteht sich von selbst. Scheibler gibt hierüber in seiner Schrift „der Tonmesser“ die verlässlichsten Regeln.

74. Terquem's Stäbe. a) Savart[10]) hatte mittelst Sandfiguren gezeigt, dass auf longitudinal schwingenden Stäben mit rechteckiger Grundfläche die querliegenden Knotenlinien auf den Gegenseiten abwechseln. Diese ruhenden Stellen haben nahezu dieselbe Lage, wie jene bei den Transversalschwingungen eines Stabes, der mit dem Longitudinalton die nämliche Tonhöhe besitzt, nur dass sie dann auf beiden Seiten des Stabes ohne Auslassungen erscheinen. Savart suchte jene Erscheinung durch eine longitudinale Zusammendrückung zu erklären, welche eine transversale Biegung des Stabes hervorrufe. Dadurch entstehe die eine Hälfte einer Querschwingung, während die andere Hälfte wegen der nachfolgenden Dehnung unterdrückt werde. Seebeck[11]) hat (1849) die Unhaltbarkeit dieser Annahme gründlich nachgewiesen und dargethan, dass diese Knotenlinien in dem Zusammenauftreten von Längen- und Querschwingungen mit gleicher Dauer ihren Grund habe, wobei die Theilchen des Stabes der Resultierenden aus beiden Bewegungen folgen.

Fig. 79.



Liegt die Mittelkraft gegen den Sand hin, so bewegt sie denselben in ihrer eigenen Richtung fort; ist sie aber während der halben Schwingung entgegengesetzt gerichtet, so bleibt der Sand ruhig. Daraus folgt dann die abwechselnde Lage der Knotenlinien. Nach Savart müssen die Sandanhäufungen an den Bäuchen, nach Seebeck an den Knoten der Transversalschwingungen erfolgen. Letzteres ist in der That nach eigens hiezu angestellten Versuchen von Seebeck der Fall. Die mehr gleitende als hüpfende Bewegung des Sandes deutet darauf hin, dass die Querbewegung die schwächere ist.

b) Terquem[12]) nahm den Gegenstand (1858) wieder auf; er gab im wesentlichen die nämliche Erklärung wie Seebeck, illustrierte jedoch das Thema durch eine schöne Versuchsreihe,

Er kam zu dem Resultate: „Wenn ein Stab denselben Ton durch longitudinale und transversale Erregung zu geben vermag, so treten der Längen- und Querschwingungston gleichzeitig auf, man mag den Stab longitudinal oder transversal in Vibration versetzen.“ Ein gleiches gilt von der Erregung zu Längen- und Drehungsschwingungen und höchst wahrscheinlich auch von Transversal- und Torsionsschwingungen [13]).

Lissajous[14]) fand bei seinen Studien über Querschwingungen in elastischen Stäben Terquem's Ausspruch gerechtfertigt. Aus dem möglichen gleichzeitigen Auftreten von Längen-, Quer- und Torsionsschwingungen in einem Stabe folgt, dass die Molecule eines solchen Körpers nicht gerade Linien, sondern mannigfache, den Ton- und Phasenverhältnissen entsprechende Curven beschreiben, was man bei dem Kaleidophon sehr schön sehen kann.

c) König hatte in London Stäbe ausgestellt, welche für die eben besprochenen Versuche nach Terquem gestimmt waren. Sie dienen also zum Nachweise: Wenn in einem Körper zwei verschiedenen Schwingungsarten angehörende Töne nahezu im Einklange stehen, so kann keiner dieser Töne für sich allein hervorgerufen werden.

d) Savart hatte bemerkt, dass einige Stäbe, wenn sie in kräftiger Weise longitudinal erregt werden, einen eigenthümlich klingenden rauhen Ton („son rauque“) geben, der eine Octave tiefer als der Longitudinalton ist.

Dieser Ton entspricht Transversalschwingungen von solcher Weite, dass gläserne Stäbe zuweilen sogar brechen, und zwar, wie Terquem gefunden hat, dicke leichter als dünne. Savart suchte dieser Erscheinung seine Erklärung (vergl. *a* dieser Nummer) anzupassen. Wertheim meinte, der Grund liege in molecularen Transversalschwingungen, die sich mit der halben Geschwindigkeit der Longitudinal-Vibrationen fortpflanzen. Terquem, der auch diese Versuche wiederholte und viele neue hinzufügte, erklärte diesen Ton aus

Transversalschwingungen eines harmonischen, um nahezu eine Octave tieferen Tones, welcher mit dem Longitudinalton gleichzeitig auftritt. In der That lässt sich der „rauhe Ton“ nur vernehmen, wenn solch' ein unterer harmonischer Querton vorhanden ist. Es gelingt indessen nicht, den Ton stetig, sondern nur unterbrochen zu erzeugen. Die entsprechende Sandbewewegung ist eine ziemlich complicierte, was daher kommt, dass die Molecule jene Bewegungen mitmachen müssen, welche den zusammengesetzten, senkrecht gerichteten Bewegungen entsprechen, und die man bei den optischen Versuchen nach Lissajous (§. 56) vor das Auge bringen kann. Die Curve ist hier als bei einem Intervalle 1 : 2 mit der Phase Null (wie jene Lichtfiguren zeigen) von der Form 8.

e) König hatte in London Stäbe vorgelegt, welche ausschließlich zur Begründung von Terquem's Theorie dienen, bezüglich der Erzeugung des „rauhen Tones“, der eine Octave tiefer als der Longitudinalton ist, und bei kräftiger Longitudinal-Erregung mit dem Längenton zugleich hörbar wird. Zwei dieser Stäbe lassen den ersten harmonischen Longitudinalton in Begleitung der tieferen Octave vernehmen.

Über die Sichtbarmachung der Knotenlinien in durchsichtigen Stäben (Glasstäben) mittelst des polarisirten Lichtes und dem darauf beruhenden „Polarisations-Vibroskop“ nach Dr. A. Kundt[15]) wird weiterhin (Anhang, VI) berichtet.

VII.

Tönende Platten.

(Königs rechteckige, nicht quadratische Messingscheiben zum Nachweise der Richtigkeit der Wheatstonischen Erklärung der Chladnischen Klangfiguren.)

75. Die ersten Versuche zur mathematischen Begründung der Chladnischen Klangfiguren. Gleich nachdem Chladni[1]) seine epochemachenden Versuche über die Klangfiguren veröffentlicht hatte, suchte J. Bernouilli[2]) nach einer analytischen Erklärung derselben, und zwar zunächst für den Fall, wie sie sich auf quadratischen Metall- oder Glasscheiben zeigen. Er nahm an, die allereinfachsten Figuren, d. i. jene, bei welchen die Knotenlinie nur einer der Seiten der quadratischen Scheibe parallel läuft, sind nichts anders, als die Knotenlinien, welche Euler[3]) für Stäbe oder Streifen theoretisch begründet hatte. Jene Schwingungen nun, welche derartige Knotenlinien erzeugten, dachte er sich rechtwinkelig mit einander combiniert, und aus dieser Zusammensetzung sollten die Klangfiguren entspringen. Es wird sich weiterhin zeigen, dass J. Bernouilli nahe der Wahrheit war; aber die Art und Weise, wie er diesen Gedanken ausführte, brachte ihn auf Abwege. Die Resultate seiner Theorie stimmten nicht mit der Erfahrung. Und wenn man selbst seinen Einwurf gelten lassen wollte, dass die durch Experiment gegebenen Figuren durch die Störungen in der Materie verzerrt erscheinen, so musste er doch selbst zugestehen, dass nach seiner Entwicklung stets nur Knotenlinien nach einer Richtung hin existieren könnten, was zu grell gegen die Thatsache abstach.

Chladni selbst sprach sich gegen diese Ansicht, welche die tönende Scheibe als ein Netzwerk senkrecht gegeneinander

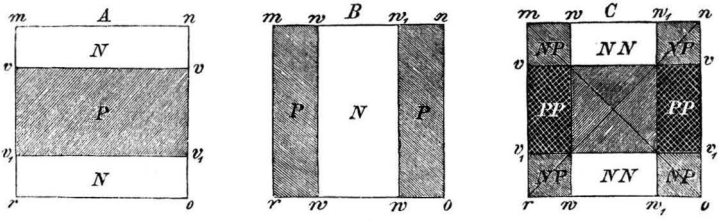
gerichteter Curven ansah, aus. Sei es, dass dieser Widerspruch des Entdeckers der Klangfiguren so mächtig einwirkte oder dass die Idee Bernouilli's nicht einleuchtete — genug, dieser fruchtbare Weg wurde erst später wieder betreten. Das Fräulein Sophie Germain[4]), Poisson[5]) und Cauchi fassten diese Aufgabe von ganz anderer Seite, ohne jedoch zu befriedigenden Ergebnissen zu gelangen.

Erst bei Dr. Young[6]) begegnen wir wieder einer ähnlichen Vorstellung, wie wir sie bei J. Bernouilli kennen lernten. Die Schwingungen einer Scheibe unterscheiden sich, wie er glaubt, von jenen eines Stabes in ähnlicher Weise, wie die Vibrationen einer Membrane von jenen einer Saite. Die Schwingungen der Theilchen der Scheibe nach der einen Richtung combinieren sich mit jenen nach einer anderen Richtung und bewirken so die mannigfachsten Modificationen.

76. Grundgedanke der Wheatstone'schen Theorie der Chladnischen Klangfiguren. a) Für sich kreuzende diagonale Knotenlinien. Wheatstone[7]) nahm das fast vergessene Thema der mathematischen Begründung der Knotenlinien an tönenden Scheiben (1833) wieder auf.

Auch er beschränkte sich vorläufig nur anf die quadratische Form der tönenden Metall- oder Glasplatten. Es werde (Fig. 80 bei *A*) eine quadratische überall homogen dichte Platte (Metall, Glas) so zum Tönen gebracht, dass die zwei Knoten-

Fig. 80.



linien vv und $v_1 v_1$ enstehen. Offenbar müssen dann die lichteren Theile dieser Scheibe mit dem schraffierten Streifen in entgegengesetzten Schwingungsphasen stehen. Nehmen wir jene Gürtel als negativ an und benennen sie mit *N*, so stellt

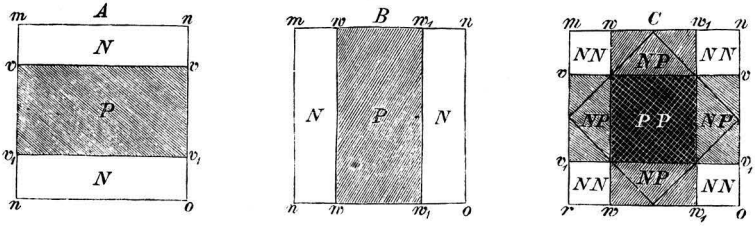
uns die mit P bezeichnete Zone den positiven Theil vor. Nun denke man sich dieselbe Scheibe so zum Tönen angeregt, dass (Fig. 80 bei B) wieder zwei Knotenlinien unter gleichen Verhältnissen entstehen, nur dass diese nunmehr senkrecht zur vorigen Richtung laufen, und dass jetzt der mittlere Theil negativ, die beiden Endstreifen aber positiv erscheinen. Da im letzteren Falle die Knotenlinien von B senkrecht gegen jene in A gerichtet sind, so müssen auch je die zugehörigen Schwingungen senkrecht gegeneinander liegen. Nehmen wir nun an, die Molecüle derselben Scheibe werden gleichzeitig zu den beiden eben besprochenen senkrecht gegen einander gerichteten Schwingungsweisen angeregt, so ist klar, dass uns nur eine Übereinanderlagerung der vorigen Zeichnungen (Fig. 80, C) Aufschluss über die Erscheinungen an der Platte geben kann.

Vor allem ist dann gewiss, dass (Fig. 80 bei C) in den mit NN und PP bezeichneten Theilen sicher keine Knotenlinie vorkommen kann, weil darin keine entgegengesetzten Schwingungsphasen auftreten. Dagegen ist eben so einleuchtend, dass der Durchschnitt der in den vorigen Fällen angenommenen Knotenlinien sicher ruhende Puncte sein werden. Durch diese werden die Knotenlinien gehen müssen. Und da in den mit N und P benannten Quadraten die Theilchen zu entgegengesetzten Schwingungen angeregt werden, und zwar (wie wir annehmen) mit gleicher Kraft; so wird die neue Ruhelinie in gleichem Abstande von jenen Knotenlinien liegen, welche zu den combinierten senkrecht gegeneinander gerichteten Schwingungen gehörten.

Die resultierenden Knotenlinien werden demnach zwei unter rechten Winkeln im Mittelpunct der Scheibe sich kreuzende Diagonalen sein.

b) Für Knotenlinien, welche parallel zu den gedachten Diagonalen laufen. Denken wir uns die vorigen Verhältnisse nur dahin abgeändert, dass (Fig. 81 bei A und B) der mittlere Theil in gleichen Schwingsphasen sich befindet, so wird (nach ähnlichen Betrachtungen wie vorhin) (Fig. 81 bei C) die resultierende Knotenlinie parallel zu den Diagonalen

Fig. 81.



und in gleichen Abständen von den Ecken der Scheibe so liegen, dass sie sich je in der Mitte der vier Seiten der quadratischen Klangscheibe schneiden.

77. *Verallgemeinerung des Vorigen.* In solcher Weise vermag man durch Zusammensetzung der senkrecht gegen einander gerichteten, gleichartigen und gleich kräftigen Schwingungen, also auch der zugehörigen Knotenlinien die Chladnischen Figuren an einer quadratischen Scheibe abzuleiten.

Die Hauptergebnisse derartiger Compositionen sind:

a) Die Durchschnittspuncte der componierenden Ruhelinien bleiben wieder Ruhepuncte in den resultierenden Knotenlinien.

b) Die Knotenlinien der einen componierenden Figur verschwinden, wenn sie von schwingenden Molecülen der zweiten componierenden Figur bedeckt werden.

c) An allen übrigen Puncten ist die neue Bewegung die Resultierende aus den vorigen Schwingungszuständen, voraus folgt:

α) Wo sich direct entgegengesetzt gerichtete Schwingungsphasen treffen, entstehen neue Knotenpuncte.

β) Haben die componierenden Figuren die Knotenlinien in gerader Anzahl, so kann der mittlere Theil an beiden in gleicher Phase (+ + oder — —) oder in entgegengesetzter sein (+ —). Daraus ergeben sich dann zweierlei resultierende Klangfiguren (Fig. 81 und Fig. 80).

d) Sind die Knotenlinien in den componierenden Figuren in ungleicher Anzahl vorhanden, so ist nur eine einzige composante Figur möglich.

78. Gesetze über die Zusammensetzung schiefer Knotenlinien. Die componierenden Knotenlinien können parallel zu den Seiten der Quatratscheibe (Fig. 80 u. 81) oder auch parallel zu ihren Diagonalen oder endlich eine beliebige Lage zwischen beiden, also eine schiefe Richtung gegen die Seiten der Klangscheibe haben, stets erfolgt die Zusammensetzung nach den entwickelten Grundsätzen. Wir nahmen in den bisherigen Fällen an, dass die componierenden Schwingungen bis auf die Phasen und Schwingungsrichtung (welche letztere senkrecht gegen einander vorausgesetzt wurden) in jeder Beziehung einander gleich seien und dass sie symmetrisch gegen eine Gerade liegen, die man sich durch den Mittelpunct der Scheibe und parallel zu den componierenden Ruhelinien gezogen denkt. Diese Gerade soll die „Axe der componierenden Schwingungen" heißen.

Bei der nach obigen Grundsätzen vorgenommenen Zusammensetzung von schrägen Knotenlinien zeigt sich nun:

a) Die resultierenden Knotenlinien sind stets parallel mit den Seiten der Klangscheibe.

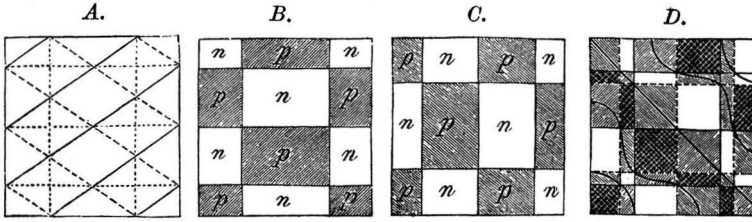
b) Sie sind in gleicher Anzahl vorhanden, wie die componierenden Knotenlinien in je einer Lage.

c) Ihre Vertheilung nach der einen oder anderen senkrechten Richtung hängt von den Winkeln ab, unter welchen sich die componierenden Knotenlinien treffen.

Diese Gesetze leitet Wheatstone aus 47 Grundfiguren[8]), sowol bei Platten mit central übereinstimmenden (+ +; — —), als entgegengesetzt bezeichneten Theilen (+ —) ab und sie sind als fest stehend zu betrachten. Bei diesen Grundfiguren sind die Knotenlinien oder die Axen der Schwingungen unter verschiedenen Winkeln gegen einander geneigt. Die Anzahl der componierenden Knotenlinien war, nach Wheatstone bei seinen Constructionen der Figuren, für eine einfache Schwingung der Theile der Scheibe höchstens zwölf.

79. Vierfache Zusammensetzung primärer Schwingungen. Viele Chladnische Klangfiguren lassen sich nur durch Übereinanderlagerung von vier einfachen Figuren ableiten. Man setzt dann je zwei, wie vorhin gezeigt wurde, zusammen.

Fig. 82.



Folgendes mag als Beispiel dienen: Bedeuten (Fig. 82, *A*) die ausgezogenen Linien die eine Lage der Knotenlinien, die gestrichelten Geraden aber die zweite Lage der Ruhelinien und bilden diese oder die Axen der Schwingungen einen Winkel von 112° 38′ mit einander; so zeigen die punctierten Linien die resultierende Knotenfigur.

Da die componierenden Geraden in ungerader Anzahl vorhanden sind, so ist nur eine einzig resultierende Figur möglich (§. 77, *d*) und zwar mit ungleichnamigen Centraltheilen. Denken wir uns diese resultierende Knotenlinien (Fig. 82, *B* und *C*) wieder senkrecht miteinander combiniert (Fig. 82, *D*); so entstehen rechteckig geformte Unterabtheilungen von den mannigfachsten Dimensionen und es ergibt sich als letzte resultierende Knotenfigur für alle vier componierende Knotenlinienfiguren jene, welche mit ausgezogenen Linien in Fig. 82 bei *D* dargestellt ist. Man braucht nämlich nur die in §§. 76 und 77 angestellten Betrachtungen hier zu wiederholen und dabei sorgfältig das Verhältnis der Lagen der positiven und negativen Theile in Fig. 82 bei *D* zu berücksichtigen, um das Resultat begreiflich zu finden.

80. Ergebnisse aus der vierfachen Combination primärer Schwingungen. Wheatstone hat aus den bereits (§. 78, Nr. *c*) erwähnten 47 einfachen componierenden Figuren eine grosse Anzahl Chladnischer Figuren auf quadratischen Platten durch vier solche Übereinanderlagerungen abgeleitet; ja, die Klangfiguren mit Curven haben sich nur aus solchen quaternären Verbindungen ergeben. Die Hauptresultate von Wheatstone's Studien über die vierfachen Zusammensetzungen primärer Knotenlinienfiguren sind:

a) Bei ungerader Anzahl der Knotenlinien in den erst resultierenden Figuren ist nur eine einzige resultierende Endfigur möglich; bei gerader Anzahl unter sonst gleichen Bedingungen aber zwei: eine für central gleichnamige (+ +; — —) und eine für ungleich bezeichnete (+ —) centrale Theile.

b) Sind in den zuerst resultierenden Figuren die Knotenlinien nach je einer der beiden Richtungen in gerader Anzahl vorhanden, so schneiden sich zwei Diagonalen im Centrum der zweiten resultierenden Figur, wenn die centralen Theile gleichnamig sind; bei gleicher Bezeichnung dieser Theile geht durch den Mittelpunct keine Linie.

c) Bei ungerader Anzahl der nach je einer Richtung gehenden Knotenlinien an der erst resultierenden Figur schneiden sich im Mittelpuncte der zweit resultierenden Figur zwei Transversalen gerade unter rechten Winkeln, vorausgesetzt, die centralen Theile sind gleichnamig. Ist letzteres nicht der Fall, dann kommen noch zwei sich kreuzende Diagonale dazu.

d) Ist die Summe der Knotenlinien in den ersten Resultierenden eine ungerade Zahl, so stimmen die centralen Theile im Zeichen nie überein, es gibt dann bei der vierfachen Zusammensetzung der Figuren nur eine resultierende Haupt- oder Endfigur mit einer einzelnen Diagonale.

81. Wheatstone's Theorie gegen die Erfahrung gehalten. *a)* Wheatstone hat in solcher Weise auf acht Quarttafeln alle von Chladni[9]) gefundenen Klangfiguren für quadratische Scheiben abgeleitet und seine Theorie mit den Erfahrungen Chladni's übereinstimmend gefunden. Vereinzelte kleine Abweichungen erklärt er in befriedigender Weise aus der schwachen Bewegung in der Nähe der Knotenlinien, aus Ungleichheiten in der Elasticität und in den Dimensionen der Scheiben, aus der Ungleichartigkeit der Schwingungen, aus kleinen Abweichungen bezüglich der Gleichheit in der Intensität der Vibrationen. Wheatstone gibt auch eine übersichtliche Tafel, in welcher die zu seinem Verfahren gehörigen Elemente, die Neigungswinkel der componierenden Knotenlinien und die

entsprechenden Töne eingetragen sind. Die Chladnische Bezeichnungsweise der Klangfiguren ist beibehalten. Wheatstone kommt zu dem Schluss: Die Töne, welche an einer quadratischen Scheibe hervorgerufen werden, sind höchst wahrscheinlich nur Functionen der Anzahl der Knotenlinien und der Länge der Axe der Schwingungen.

b) Nach Strehlke[10]) sollen alle Knotenlinien gekrümmt, und daher die scheinbar geraden nur weit gestreckte Hyperbeln sein. Der Durchschnitt der Knotenlinien wäre nur Täuschung. Ihre vollständige Trennung an den betreffenden Puncten erfolgt nicht, weil hier die Bewegung der Scheibenmolecüle zu schwach ist, um den Sand wegzuschleudern. Keine Knotenlinie endet demnach innerhalb der Klangplatte. Wheatstone[11]) meint, dass diese Trennung der Linien nur von der Inhomogenität und den ungeraden Dimensionen der Scheiben herkomme. Bei quadratischen Platten, welche alle idealen Forderungen erfüllen würden, bei welchen also die Töne im vollkommensten Einklange stünden, dürften keine Ausweichungen der Knotenlinien vorkommen.

82. *Grenzen der Zusammensetzung primärer Schwingungsweisen. a)* Da eine bestimmte Anzahl paralleler Geraden unter sehr verschiedenen Winkeln gegen einander geneigt sein können, so sollte man meinen, dass eine unbegrenzte Menge daraus resultierender Knotenfiguren möglich sei. — Und doch lehrt die Erfahrung, dass die Anzahl der Klangfiguren keineswegs unendlich groß sei. Die Ursache scheint, nach Wheatstone, darin zu liegen, dass bei den Platten (wie bei den Stäben) an jedem Ende ein Schwingungsmaximum liegen müsse. Führt man bei der Construction der resultierenden Figuren diese Bedingung ein, so ergibt sich eine beschränkte Anzahl von Winkeln, unter welchen die primären Knotenlinien gegeneinander geneigt sein müssen, woraus wieder nur eine bestimmte Menge resultierender Klangfiguren entspringt.

So z. B. sind bei Einhaltung obiger Bedingung für acht gegebene, parallele Knotenlinien für gleich bezeichnete centrale Theile resultierende Figuren nur möglich, wenn die primären Knotenlinien unter 90° oder

143°, 8° gegen einander geneigt sind. — Für entgegengesetzt bezeichnete centrale Theile betragen diese Winkel, unter sonst gleichen Bedingungen 118°, 4′ oder 163°, 44′.

b) Die von Wheatstone der Erfahrung entnommene Bedingung bezüglich der Schwingungsmaxima an den Enden ist sehr plausibel; nur hinsichtlich der Berechnung der Neigungswinkel der componierenden Knotenlinien gegeneinander hat sich Wheatstone eine Ungenauigkeit erlaubt. — Er geht nämlich dabei von der Analogie transversal schwingender Stäbe mit freien Ende aus und baut auf dem Satze: Jeder Theil vom freien Ende bis zur ersten Knotenlinie beträgt die Hälfte des Abstandes zweier mittlerer Knotenlinien. Dies ist jedoch sowol nach der Erfahrung, als nach der Rechnung für die Lage der Knotenlinien an transversal vibrierenden Stäben mit freien Enden unrichtig[12]). Es werden daher auch die Neigungswinkel der primären Knotenlinien gegeneinander etwas anderes als bei Wheatstone sein. Diese Abweichung berührt selbstverständlich das Princip der Wheatstone'schen Theorie gar nicht und die Resultate nur unwesentlich, indem die Ungenauigkeit sich nicht so weit erstreckt, dass ganz anders gestaltete Figuren daraus entsprängen, als sie sein sollten.

Wenn an einem mit beiden Enden freischwingenden Stabe von der Länge L zwei Knotenlinien entstehen; so gibt man gewöhnlich die Regel, dass jeder derselben $\frac{L}{5}$ vom entsprechenden Stabende liege. Dies ist aber sehr ungenau. Denn bei einem Stabe von z. B. 280^{mm} Länge müsste dann ein reiner Ton entstehen, wenn derselbe 56^{mm} von jedem seiner Enden auf der Kante von Holzprismen ruhete und mittelst eines Korkhammers oder Tampons in der Mitte oder am Ende angeschlagen würde. Dies war jedoch, wie ich mich mittelst Stäben aus Stahl von 280^{mm} Länge überzeugte, nie der Fall. Der Ton trat bei meinen Versuchen erst dann rein und voll auf, wenn die auf den Stützen ruhenden Puncte 64^{mm} d. i. 0·2285 L vom Ende ablagen. Dieses stimmt mit den durch die Rechnung gegebenen Zahlen von Strehlke (0·22416 L) und Weber (0·2244) ganz gut, wenn man bedenkt, dass auch die Eigenthümlichkeit des Stoffes Einfluss nehmen dürfte, und dass die Grenzen bezüglich der Bestimmung der Reinheit des Tones etwas weit sind und von der Subjectivität des Beobachters abhängen. Nach der von Lissajous[13]) gegebenen Formel für die Lage S jeder der beiden Knoten von je einer der freien Enden des Stabes wäre $S = 66{\cdot}675^{mm}$, wenn $L_1 = 280^{mm}$ ist.

83. Wheatstone's Klangfiguren auf Holzplatten. a) Wenn eine dünne quadratische Holzplatte so zubereitet wird, dass ihre Längenfasern parallel zu der einen Seite laufen, dann werden die Axen der größten und kleinsten Elasticität gegen einander senkrecht gerichtet und parallel zu den an einander stoßenden Seiten sein. Eine solche Holzscheibe wird, bei sonst gleichartigen, aber senkrecht gegen einander gerichteten Vibrationen der Molecüle zwei verschiedene Töne geben, je nach den Richtungen der Schwingungen, obschon die Größe und Form der schwingenden Plattentheile in beiden Fällen einander gleich sind. Die differierenden Töne können daher nicht gleichzeitig auftreten. Eine Klangfigur mit Diagonalen ist folglich auf einer solchen Holzplatte unmöglich. Dies folgt aus der Wheatstone'schen Theorie der Klangfiguren auf quadratischen Scheiben und die Erfahrung hat es bestätiget.

b) Wenn jedoch die Holzscheibe nicht quadratisch, sondern rechteckig derart gestaltet ist, dass sich die Längen ihrer Seiten umgekehrt wie die Grössen ihrer Elasticitäts-Axen verhalten, so sind Figuren mit Diagonalen oder Parallelen zu letzteren möglich. In der That erhielt Wheatstone derartige, zur vierfachen Zusammensetzung gehörige Klangfiguren, als er eine rechteckige Scheibe aus Holz zum Tönen brachte, bei welcher die Fasern nahezu geradlinig waren und bei der sich die Seiten wie 28 : 59 verhielten.

84. Savart's Klangfiguren auf ungleichartig elastischen Platten. Savart[14]) hatte schon früher schöne Versuche gemacht über die Änderung der Töne und Klangfiguren bezüglich kreisförmiger Holz- und Krystallplatten, welche zu den Elasticitäts-Axen verschieden geschnitten waren. Die Ergebnisse seiner Studien stimmen vollkommen mit der Wheatstone'schen Theorie der Klangfiguren.

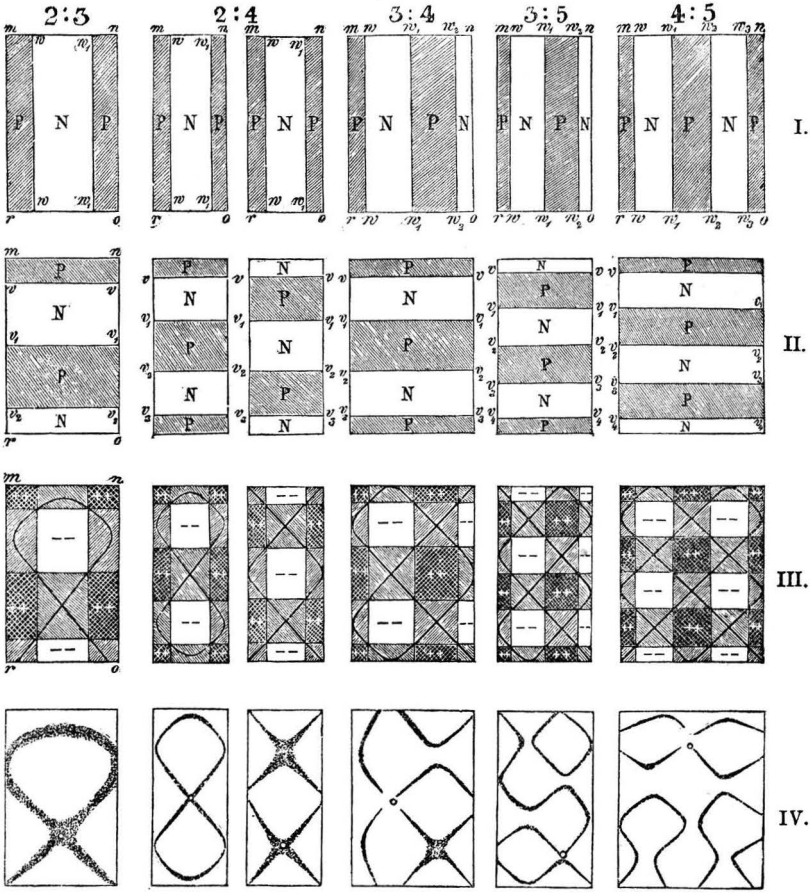
85. Die Gebrüder Weber und Wheatstone bezüglich der Theorie der Klangfiguren. Die Gebrüder Weber[15]) haben eigentlich schon vor Wheatstone (wie letzterer selbst sagt) den wahren Grund der Chladni'schen Klangfiguren erkannt. Sie haben

nämlich in einem quadratischen Gefäße Flüssigkeitswellen (Wasser, Quecksilber) so erregt, dass je ein Wellensystem parallel zu den senkrecht an einanderstoßenden Seiten fortschritt. Wegen der Interferenz dieser Wellen entstanden Ruhelinien, wie sie in Fig. 80 u. 81 dargestellt worden sind. Wheatstone bekam jedoch von dieser Arbeit erst dann Kenntnis, nachdem er in seiner Theorie selbständig weit vorgeschritten war. Streng genommen, bleibt also Wheatstone nur das Recht der Priorität auf die vierfache Zusammensetzung der Schwingungen in quadratischen Glas- oder Metallscheiben.

86. Zusammenfassung des Vorigen. Aus dem bisher Vorgetragenen folgt, dass an einer quadratischen Glas- oder Metallplatte zwei oder vier gleich hohe Töne erklingen können, welchen verschiedene Schwingungsrichtungen zu Grunde liegen. Es dürfte nun erlaubt sein, Terquem's Gesetz (§. 74) auch auf tönende Platten auszudehnen. Demnach wäre es nicht möglich einen dieser im Einklang (oder fast im Unisono) stehenden Töne vereinzelt, ohne Erklingen der andern, gleichen Töne, hervorzurufen. Die Klangfiguren an quadratischen Metall- oder Glasscheiben entspringen also aus der Coexistenz von gleich hohen Tönen, zu welchen aber verschiedene Schwingungsrichtungen gehören. Der Umstand, dass alle Chladni'schen Figuren auf quadratischen Scheiben mit den aus dieser Theorie abgeleiteten Figuren der Hauptsache nach übereinstimmen, dient dieser Ansicht als bedeutende Stütze, so wie auch das erwähnte Experiment mit den Holzplatten, bei welchem erst dann die Klangfiguren mit sich kreuzenden Diagonalen erhalten werden konnten, als die Platte, durch Abänderung der Dimensionen der zwei hier in Betracht kommenden Axen, dahin gebracht wurde (bei entsprechender Anregung) nach den beiden Axenrichtungen den nämlichen Ton zu geben.

87. König's experimentelle Erweiterung der Wheatstone'schen Theorie. α) So stand die nur wenig gekannte Theorie Wheatstone's, als König (1862) den Gegenstand wieder aufnahm und weiter brachte. König[16]) verfertigte (Fig. 83) fünf Messingplatten von rechteckiger, nicht quadratischer Form

Fig. 83.



und stimmte sie derart, dass nahezu im Unisono stehende Töne an derselben auftraten, sowol wenn (Fig. 83, I.) die Knotenlinien parallel zu der einen Seite oder (Fig. 83, II.) in einer andern Anzahl parallel zu jener Seite laufen, welche zur vorigen Seite senkrecht gerichtet ist.

Bei Übereinanderlegung dieser Knotenlinien oder bei der Zusammensetzung der zugehörigen, unter rechtem Winkel sich schneidenden Schwingungsrichtungen mussten nach der Wheatston'schen Theorie die in der Reihe III. (Fig. 83) construirten

Figuren auftreten. Und dies war in der That (Reihe IV. Fig. 83) der Fall!

1. Die in der Reihe I und II (Fig. 83) gezeichneten Knotenlinien wurden, um die richtige Lage derselben zu erhalten, auf messingenen Streifen, von König erzeugt und dann genau abgenommen. Aus diesen sorgfältig verfertigten Copien wurde die Reihe III durch die senkrechte Combination construiert. Die Figuren der Reihe IV sind auf den König'schen Messingplatten wirklich hervorgerufen, und auf feuchtem Papier abgedruckt worden. Die kleinen Kreise in diesen Figuren zeigen die Befestigungsorte der Messingscheiben. Die betreffenden Figuren wurden später auf eine Wandtafel geklebt, photographirt und nach diesen guten Lichtbildern gegenwärtige Figur in Holz in etwas vergrößertem Maßstabe, jedoch möglichst genau geschnitten.

2. Die Fig. 83 über der ersten Reihe stehenden Verhältnissezahlen (2 : 3; 2 : 4; 3 : 4; 4 : 5) zeigen die Anzahl der Knotenlinien auf den darunter befindlichen Abbildungen der Messingplatten, und zwar bedeutet der Zähler die Anzahl der Knotenlinien, welche parallel mit der längeren Seite laufen, während sich der Nenner auf die Parallelen zur kürzeren Seite bezieht.

b) Die auf den König'schen Messingplatten erhaltenen, hier verkleinert, aber möglichst treu wiedergegebenen Klangfiguren stimmen mit den Curven der rechtwinkeligen Combinationen zweier Schwingungsbewegungen für die gleichen Tonverhältnisse vollkommen überein (Fig. 63 u. 68) und zwar für jenen Phasenunterschied, bei welchem sich die zwei Hälften der vollständig entwickelten Curven decken (pag. 109, Anmerkung 1).

c) Obwol diese König'schen Scheiben ziemlich groß sind (20^{cm} Länge) und also leicht verschieden gestaltete Knotenfiguren hervorrufen lassen; so kommt dennoch (fast ohne Ausnahme) beim ersten Bogenstrich jene Figur, für welche die Platte nach Wheatstone's Theorie gestimmt ist — vorausgesetzt, dass sie richtig eingespannt, d. h. dass sie in einem Knotenpunct — oder an einem Orte gehalten wird, in dem sich zwei oder mehrere Knotenlinien der gesuchten Figur schneiden.

d) Bei Stäben, in welchen sich die Schwingungen senkrecht gegen einander combinieren, kann keiner der beiden, zu den verschiedenen Schwingungsrichtungen gehörenden Töne gut hervorgebracht werden, wenn sie genau im Einklang stehen. König wollte nun untersuchen, ob diese Erfahrung

auch für Platten gelte. Er benützte dazu die Gelegenheit, als er seine Platten construierte. Er stimmte nämlich die mit (2 : 3) bezeichnete Scheibe derart um, dass er die Theilung durch drei parallele Gerade von einem zu tiefen Tone bis zu einem zu hohen Tone übergehen ließ.

In Folge dessen ging die zu den zwei geraden parallelen Knotenlinien gehörige Theilung von einem zu hohen zu einem zu tiefen Tone über. Er fand so, dass die Platte den Ton am reinsten hören ließ und die Figur am schärfsten gab, wenn der Tonunterschied einen starken ganzen Ton betrug. Dann war beim Hervorrufen der Figur nichts Gezwungenes, ein leichter Bogenstrich und sie zeichnete sich äußerst nett ab. Die Platte klang dann wie eine angeschlagene, wohl gestimmte Glocke lange nach.

c) Aus dem letzten Versuche folgt, dass Wheatstone's Ansicht über die Ursache der sich ausweichenden Knotenlinien, ohne neue Gründe, nicht haltbar ist. Er meinte nämlich (§. 81, *b*), dass bei den genauen Versuchen Strehlke's ein Durchschnitt der Knotenlinien deshalb nicht erfolge, weil kein vollkommener Einklang der primären Töne stattgefunden habe. Die zuletzt erwähnten Studien König's zeigen jedoch: Wenn dieser ideale Einklang erreicht werden könnte, dass dann wahrscheinlich die Platte alle andern Figuren eher geben würde, als diejenige Zeichnung, welche aus der Combination der zu diesen ideal übereinstimmenden Tönen gehörenden Schwingungen entstehen sollte.

In den von den Knotenlinien nahezu umschlossenen Theilen war (Fig. 83, IV.) noch etwas Sand liegen geblieben, was in der Zeichnung weggeblieben ist.

VIII.

Die Luft als tönender Körper (Pfeifen).

88. Pfeifen nach Cavaillé-Coll. *a*) König zeigte in London eine Reihe Pfeifen von verschiedener Tiefe und gleicher Länge, welche zur Illustration des so wichtigen und praktischen Gesetzes von Cavaillé-Coll [1]) dienen, nach welchem die Länge der Pfeife gleich der Länge der Welle des entsprechenden Tones weniger der doppelten Tiefe ist.

b) Daniel Bernouilli hat auf dem Wege des Calculs gezeigt, dass die Tonhöhe einer Pfeife im umgekehrten Verhältnisse mit der Länge des Pfeifenrohres steht, wobei von der Anblasevorrichtung abgesehen wurde. Bei dem experimentalen Nachweise und der Bestätigung dieses Gesetzes musste (um den mathematischen Bedingungen zu genügen) die Luftsäule in der Röhre durch vorgehaltene, entsprechend schwingende Körper, etwa eine Stimmgabel, in Vibration versetzt werden. Weil die Lage, Größe und Form des Mundes die Tonhöhe beträchtlich abänderten, so konnte dieses theoretische Gesetz in der Praxis nur im Allgemeinen leiten, d. h. dass ein längeres Rohr einen tieferen Ton gibt. Die Orgelbauer mussten hier durch Tatonnieren das rechte Maß zu treffen suchen. Cavaillé-Coll in Paris (einer der Ersten, welcher das große Verdienst unseres Scheibler's zu würdigen verstand, vergl. Seite 152) hat in jüngster Zeit die obige, aus einer großen Versuchsreihe abgeleitete praktische Regel bekannt gegeben, mittelst welcher die Orgelbauer auf das Sicherste die Dimensionen ihrer Pfeifen bestimmen können. Das Gesetz ist so einfach, dass selbst der schlichte Arbeiter ohne Anstand sich darnach richten kann.

Bezeichnet L die Länge der Röhre, von der Mundöffnung bis an ihr Ende gemessen, C die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, N die Anzahl der einfachen Schwingungen des gesuchten Tones, T die mittlere Tiefe (deren Berechnung wir gleich angeben werden) der Pfeife, so ist nach Cavaillé-Coll ..... $L = \frac{C}{N} - 2\,T$ .... (1

Die mittlere Tiefe T ist das Mittel der Senkrechten, welche auf die Linie der Mundöffnung in der Ebene des Querschnittes bis an die innere Fläche der Gegenwand gezogen werden. Sie hat bei cylindrischen Pfeifen (bei welchen die Mundöffnung gewöhnlich $^3/_4$ des inneren Umfanges beträgt, nahezu den Werth von $^5/_6$ des Durchmessers D, d. h. für cylindrische Pfeifen gilt: $L = \frac{C}{N} - {}^5/_8\,D$ ..... (2, wo L, C und N die Bedeutung wie in Formel 1 behalten.

1. Ein Beispiel nach Cavaillé-Coll soll diese Regel erläutern: Eine seiner Hohlpfeifen mit quadratischem Querschnitt für den Ton c mit 264 einfachen Schwingungen hat die Länge von $1{\cdot}130^m$ von der Mundöffnung gerechnet und eine mittlere Tiefe von $0{\cdot}08^m$. Die Schallgeschwindigkeit zu 340^m genommen, folgt nach obiger Regel:

$$L = \frac{340^m}{264^m} - 0{\cdot}16^m$$
$$= 1{\cdot}126^m.$$

Dies weicht von der wirklichen Länge $1{\cdot}130^m$ um weniger ab, als der Beobachtungsfehler ausmacht. Interessant ist hierbei, dass Cavaillé-Coll das deutsche Normal-a^1 (vergl. p. 27) zu Grunde gelegt hat, was wahrscheinlich damit zusammenhängt, dass er einer der ersten war, der die Scheibler'sche Stimm-Methode in seinem Atelier einführte.

2. Aus $L = \frac{C}{N} - 2\,T$.(3) folgt

$$N = \frac{C}{L + 2\,T} \ldots\ldots (4)$$

$$T = {}^1/_2 \left(\frac{C}{N} - L\right).(5)$$

$C = (L + 2\,T)\,N$..(6), welche Formeln in den geeigneten Fällen zur Aufsuchung der Größen N, T oder C dienen können.

c) Wertheim[2]) fand die von Cavaillé-Coll aufgestellte Regel für den Pfeifenbau mit der Formel, die er selbst für die Schallgeschwindigkeit ableitete, vollkommen übereinstimmend. Indem er nun jene Formel mit der von ihm gege-

benen für die Schallgeschwindigkeit in Relation setzte, kam er zu dem Resultate: Die von Cavaillé-Coll gegebene Correction ist nach den Werthheim'schen Formeln giltig, wenn bei Pfeifen mit quadratischem Querschnitt, dieser 13·13mal, und bei cylindrischen Pfeifen, wenn der Querschnitt 11·08mal den Flächeninhalt der Mundöffnung beträgt.

89. Einfluss eines äußeren Tones auf die Flamme einer chemischen Harmonica. a) Es wird nicht leicht einen Freund der Naturlehre geben, dem der interessante Versuch unbekannt wäre, der unter dem Namen der „chemischen Harmonica“ [3]) alljährlich in den Vortragssälen der Chemie und Physik den Hörern vorgeführt wird. Dieses schon in seiner einfachsten Form fesselnde Experiment hat in neuerer Zeit (seit 1857) durch eine Entdeckung des Grafen Schaffgotsch ein erhöhtes Interesse bei den Naturforschern gewonnen. Graf Schaffgotsch [4]) hat nämlich gefunden, dass ein in der Nähe einer chemischen Harmonica erregter musikalischer Ton, der mit jenem der Harmonica (wie sich später gezeigt hat „nahezu“) in Einklang steht oder um eine Octave höher ist, auf die schwingende Luftsäule im Harmonicarohr einen so mächtigen Einfluss ausübt, dass die Flamme dabei lebhafte Bewegungen sehen lässt und wenn sie genügend klein ist, bei wachsender Stärke des äußeren Tones sogar — verlöscht. Bei einer gewissen Größe und Stellung der Flamme in der Röhre hört man, wie Poggendorff [5]) bemerkte, gleichzeitig zwei bezüglich der Höhe wenig von einander verschiedene Töne, welche „Stöße“ oder „Schläge“ geben, die durch das Zucken der Flamme sichtbar werden. Die Flamme bei diesen Versuchen lieferte das in größeren Städten so leicht zu habende Leuchtgas; es können aber, wie sich herausgestellt hat, noch andere brennende Gase dienen; am besten bleiben das Wasserstoffgas und das Leuchtgas. Es ließ sich voraussagen, dass ein so netter Versuch vielseitig wiederholt werden wird. In der That erschien bald eine Reihe kleinerer oder größerer Arbeiten über diesen Gegenstand, von welchen in erster Linie jene Tyndall's [6]) genannt werden müssen. Tyndall findet

mit Chladni[7]), dass die Höhe des Harmonica-Tones, wie bei den gewöhnlichen Pfeifen, von der Länge der Röhre abhängt. Bei gleich langen Röhren liegt es an der Größe der Flamme und der Orte, wo sie sich in der Röhre befindet, ob die Röhre den Grundton oder einen ihrer harmonischen Obertöne gibt. Letztere werden durch Verkleinerung und Verschiebung der Flamme hervorgerufen.

1. Durch derartige Regulierung der Flamme erhielt Tyndall bei einer 25 engl. Zoll langen Röhre die harmonische Tonreihe 1, 2, 3, 4 und 5. Der Grundton entsprach dem gewöhnlichen Pfeifengesetz.

2. Bei einer sehr kleinen Flamme gab ein Rohr von $14\frac{1}{2}$" seinen Grundton und die Octave.

3. Eine Röhre von $12\frac{1}{2}$" wollte erst bei einer sehr kleinen Flamme ansprechen. Der Ton war die Octave von dem Grundton der Röhre von 25" Länge bei größerer Flamme. Bei dieser kleineren Flamme gab aber auch die 25" lange Röhre den nämlichen Ton, wie die nur halb so lange. Die schwingende Luftsäule musste also in zwei gleich lange Theile zerfällt worden sein.

b) Den Einfluss des Tones auf die Harmonicaflamme prüfte Tyndall mittelst einer Sirene. Dieselbe wurde einige Fuß von der Flamme aufgestellt und der Ton nach und nach gesteigert. Sobald dieser Ton dem Tone der sogenannten „singenden Flamme" nahe kam, begann diese lebhaft auf und nieder zu schwingen. Dies geschah in um so längeren Pausen, je mehr sich beide Töne dem Einklange näherten. Beim vollkommenen Einklange war die Flamme ruhig. Als jedoch der Sirenenton allmälich erhöhet wurde, begann das Zucken der Flamme wieder, und die Zwischenzeiten wurden um so kleiner, je mehr sich die beiden Töne von einander unterschieden. Was konnte demnach dieses regelmäßige Auf- und Niederflackern anders sein, als die sichtbare Einwirkung der „Stöße" oder „Schläge"? Und als solche wurden sie auch sogleich von Tyndall erkannt. Diese Stöße wird man selbstverständlich auch durch andere Tonquellen, etwa durch Stimmgabeln, Gesang u. s. w. bei passender Differenz der Töne hervorrufen können.

Das Zusammenfallen des Zuckens mit den Stößen lässt sich einem größeren Publicum vorführen, wenn man eine

Stimmgabel, welche mit der chemischen Harmonica im Einklange steht, durch Ankleben von Wachs u. dgl. etwas tiefer stimmt, und letztere vor einer Resonanzröhre, einem Resonanzgefäße tönen lässt. Um die Flamme dem Auditorium besser ersichtlich zu machen, kann sie durch geeignete Mittel gefärbt werden, am einfachsten gelb mittelst Kochsalzstaub, der in der Nähe aufgewirbelt wird. Eine kräftige leuchtende Flamme lässt sich auch bei gläsernen Röhren mittelst einer Sammellinse auf einem weißen Schirm projicieren.

1. Wäre die chemische Harmonica verlässlicher, so hätte man das einfachste Stimm-Mittel nach Scheibler'schen Grundsätzen (§. 71), und auch hier könnte dann ein Tauber trefflich stimmen, und sogar viel einfacher, als nach dem Verfahren von Lissajous. Indeß können wenigstens diese Stöße dazu dienen, den Ton der chemischen Harmonica genau anzugeben, und seine Schwingungszahl zu messen, wenn man die Tonhöhe des äußeren tönenden Körpers genau kennt.

2. Nach Tyndall gelingen obige Versuche bei einer Ausflussöffnung von $^1/_{20}$" Durchmesser am besten mit Röhren von 11 bis 12" Länge. Längere Röhren bieten einige Schwierigkeiten.

c) Auch eine noch schweigende Flamme kann, wie Tyndall gefunden, durch einen äußern Ton zum „Singen" gebracht werden. Damit dies geschehe, ist ein solcher Unterschied zwischen dem erzeugenden Ton und dem anzuregenden Ton nothwendig, dass „Stöße" möglich seien.

Um des Gelingens dieses Versuches sicher zu sein, geht man, wie folgt, vor:

In jeder Klangröhre gibt es einen Punct, in welchem die Flamme am stärksten „singt". Ist dieser beste Ort gefunden, so wird die Flamme hinabgerückt bis zur Stelle, wo das „Singen" authört. Etwas ober diesem untern Grenzpuncte spricht die chemische Harmonica an, sobald von außen der ihr nahe Ton angeschlagen wird, und sie hört auf, sobald ein anderer Ton in der Nähe hervorgerufen wird. In dieser Weise hat man es in seiner Gewalt, die Harmonica zum Gehorchen zu bringen; ja sie lässt sich geradezu commandiren, wenn das befehlende Wort den Harmonicaton enthält. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn die rechte Stelle für die Flamme getroffen worden ist. Liegt letztere

dem unteren Grenzpuncte zu nahe, so gehorcht sie nur kurze Zeit und zwar nur im Anfange. Bei größerer Bemühung lässt sich eine ganze Tonleiter solcher „singenden Flammen" zusammenstellen, von welchen jede, wenn auf einem Instrument die Tonleiter gespielt wird, zu tönen beginnt, sobald ihr Ton an die Reihe kommt. Dieser Ton muss, wie schon erwähnt, mit dem hervorzurufenden Ton „Stöße" zu erzeugen vermögen und er darf nicht zu weit von letzterem abliegen. Von zwei nur um einen halben Ton differierenden Stimmgabeln vermochte z. B. bei Tyndall's Versuchen nur die eine Stimmgabel die Flamme zum Singen anzuregen.

d) Graf Schaffgotsch[8]) hat eine größere Reihe schöner Versuche bezüglich des Einflusses eines äußeren Tones auf die Luftsäule in einer nahezu gleichgestimmten Röhre veröffentlicht. Wir werden unten auf einige Details dieser Arbeit zurückkommen. Im Ganzen ist hierüber zu bemerken, dass seine Erfahrungen mit jenen Tyndall's übereinstimmen. Die singende Flamme zeigt sich um so empfindlicher, je kleiner sie ist und je tiefer sie in das Harmonicarohr hineinragt; doch gilt dies nur bis zu jenem bereits erwähnten „besten Orte". Das Auslöschen der Flamme wird um so besser glücken, je stärker der äußere Ton im Vergleiche mit der Größe des Flämmchens ist, also je kleiner letzteres und je näher dem Flämmchen der beeinflussende Ton hervorgerufen wurde.

1. Ein Rohr gibt nach Schaffgotsch beim schwachen Anblasen mit dem Munde zwar keinen Ton, jedoch deutlich den Grundton, der ihm als offene Pfeife zukommt. Beim raschen Schlagen mit der flachen Hand auf eine der Mündungen und beim schnellen Zurückziehen ist der der offenen Pfeife entsprechende Grundton und darauf folgend die nächst höhere Octave zu vernehmen. Durch die Erwärmung werden diese Töne, wie es sich voraussehen lässt, und wie mehrseitig (von Schaffgotsch, Tyndall u. a.) experimentell bestätigt wurde, erhöhet. Schaffgotsch machte die meisten seiner ersten Versuche mit einer Röhre von 242^{mm} Länge und 20^{mm} Weite, welche den Grundton e^1 gab, und welche er die „*e*-Röhre" nennt. Ferner mit einer 273^{mm} langen und 21^{mm} weiten Röhre vom Grundton d^2, welches das „*d*-Rohr" heißt. Den Einfluss eines äußeren Tones auf die innere Luftsäule der Röhren wies er nach mittelst Rauches, eines Gasstromes und einer Flamme. Wie

ehedem Pictet mit Hilfe des Rauches den Schwingungszustand in der chemischen Harmonica studierte, so that es auch Schaffgotsch.

Ein glühendes Räucherkerzchen sendete den Rauch in gerader Linie durch das scheitelrecht gestellte „*e*-Rohr". Beim Singen eines e^1 in der Entfernung von $1\frac{1}{2}^m$ wirbelte der Rauch und es war so, als ob er bei der Mündung hinausgeworfen würde. Die Bewegung der Wasserstoffgasströme wurde dadurch ersichtlich gemacht, dass über die Gas aussendenden Brenner Platinschwämme zum Erglühen kamen, ähnlich wie bei dem Dobereinerschen Feuerzeug. Geräusche hatten nur dann einen Einfluss auf die Harmonicaflamme, wenn sie einen dem Harmonicaton nahen Ton enthielten.

Im „*d*-Rohr" brannte aus einer $0{\cdot}5^{mm}$ engen Öffnung ein kleines Flämmchen unter schwachem Drucke. Darüber 5^{mm} entfernt strömte unter stärkerem Drucke aus einem kleinen Brenner Gas.

Dasselbe wurde von der unteren kleineren Flamme unter gewöhnlichen Umständen nicht entzündet. Sobald aber d^1 stark gesungen wurde, entflammte sich der obere Gasstrom am verlängerten unteren Flämmchen, welches darauf erlosch. Eine Reihe von bestimmten chemischen Harmonicatönen könnte also in ähnlicher Weise zum Analysiren von zusammengesetzten Schalläußerungen dienen, wie die vorzüglichen Resonatoren von „Helmholtz". Dass aber letztere praktischer sind, bedarf keiner näheren Auseinandersetzung. Um für beliebige Töne ein passendes Rohr zu besitzen, brachte Schaffgotsch eine Röhre in die andere verschiebbar ein (Zwischenpapier bot die Haltpuncte). Dieses nach Bedarf zu verkürzende oder zu verlängernde Rohr nennt der Erfinder „Hauchposaune". Sie kann sowol als Harmonicaröhre als auch zur Resonanzröhre für den äußern Ton einer Stimmgabel dienen. Den zum Gelingen erforderlichen constanten Gasdruck bewirkte Schaffgotsch am einfachsten und besten, wenn das Gas in einen der käuflichen sogenannten permanenten Pariser Luftballone, d. i. in einen sehr dünnen Kautschuckbeutel oder in eine gute Thierblase gefasst und aus diesem durch aufgelegte Gewichte gepresst wurde. Um die schwache Wasserstoffflamme leuchtender zu machen, vermischte er das Gas mit Benzindunst, oder er erregte in der Nähe eine Kochsalzstaubwolke, um die Flamme gelb zu färben.

2. Analoge Erscheinungen. Le Conte[9]) fand (1858) gelegenheitlich, dass eine Fischschwanzflamme von Leuchtgas nach oben pulsirte entsprechend den hörbaren Stößen einer Musik, bei welcher ein Clavier, eine Violine und ein Violoncello verwendet waren. Die Erscheinung trat besonders deutlich bei den starken Noten des Violoncello's und bei den Trillern hervor. Ein Tauber hätte gewissermassen die Musik sehen können. Das Zucken der Flamme trat nach Le Conte's hierauf angestellten Versuchen nur dann ein, wenn der Gasdruck sich jener Grösse näherte, bei welcher die Flamme flatterte. Mechanische Einflüsse, wie Schlagen und Stoßen an der Wand, auf den Fussboden blieben ohne Einfluss.

Le Conte glaubt, diese Erscheinung sei in ähnlicher Weise zu erklären, wie der von Savart und Plateau beobachtete Einfluss von Luftschwingungen auf einen Ausflussstrahl (vergl. pag. 181). Er nimmt daher eine Cohäsion der Gase an. Das Singen der Flammen vergleicht er mit dem von Savart beobachteten Tönen, wenn Flüssigkeiten aus kurzen Ansatzröhren ausströmen.

Sondhaus [10]) ist (1861) mit der Le Conte'schen Erklärung durch Cohäsion der Gase nicht einverstanden. Diese Annahme lasse die chemische Harmonica und folgenden Versuch unerklärt. In der halben Mündung einer Glasröhre (150 bis 240^{cm} L, unten erweitert 1·^{5cm} bis 2·^{2cm}) wird eine kleine Spiritusflamme gebracht und mit dem Munde ein schwacher Strom durch die Röhre getrieben — man hört einen lauten, pfeifenden Ton. Ohne Flamme lässt sich nur ein heulender Ton, mit dem Streben in den deutlichen Ton überzugehen, vernehmen.

3. Arndtsen [11]) beobachtete bei einem Concert, dass ein sehr starker Ton, z. B. ein Paukenschlag, jedesmal von allen Gasflammen nahezu gleichzeitig (telegraphisch) angezeigt wurde, indem sie etwas niedriger wurden.

90. Optische Analyse der singenden Flammen. Es wird sich weiterhin zeigen, dass die Ansicht, der Harmonicaton sei die Folge einer Reihe von Explosionen in der Röhre, die verbreitetste ist. Solche successive Explosionen sollten sich an der Flamme kundgeben, welche discontinuirlich erscheinen müsste.

Nun könnte aber wegen der Schnelligkeit, mit der die Verpuffungen und also auch die Unterbrechungen der Flamme auf einander folgen, die Nachdauer der Flammenbilder auf der Netzhaut bewirken, dass die Flamme ununterbrochen da zu sein schiene — ohne dass es in Wirklichkeit so wäre. Man denke sich einen Stern, einen elektrischen Funken u. dgl., der in äußerst kleinen Zwischenzeiten, also unendlich rasch abwechselnd aufblitzt und wieder verlöscht, so wird (wenn das Bild stets auf die nämliche Stelle der Netzhaut fällt) der Beobachter ein constantes Leuchten wahrzunehmen glauben. In solcher Weise könnte es sich auch hier mit der singenden Flamme verhalten. Um darüber in's Klare zu kommen, ist eine „optische Analyse" derselben erforderlich. Eine solche besteht im Wesentlichen darin, dass man den Bildern des leuchtenden Gegenstandes stets andere Stellen der Netzhaut des Auges zum Nachklingen bietet. Dies ist in dreierlei Weise möglich. Ent-

weder man verschiebt rasch den leuchtenden Körper oder sein Bild oder die Netzhaut. Letzteres natürlich nur, indem man den Kopf bewegt. Von allen drei Arten ist Gebrauch gemacht worden. Das Licht einer schnell geschwungenen glühenden Kohle erscheint als feurige Linie, weil die Bilder desselben noch an den verschiedenen Stellen der Netzhaut nachwirken. Wenn jedoch die Kohle während des Schwingens sehr rasch in alternierender Weise leuchtend und dunkel würde, so müsste sich dies zeigen, indem entsprechende Stellen der Netzhaut ohne Bild blieben [12]). Ebenso möchte dies zu Tage treten, wenn zwar die mit schneller Unterbrechung erglühende Kohle ruhig bliebe, hingegen ihr Bild geschwungen würde oder, wenn der Beobachter den Kopf rasch hin und her bewegte. In gleicher Weise muss es sich mit der singenden Flamme verhalten. Ist sie continuirlich leuchtend, so wird sich dies zeigen, wenn entweder sie selbst, ihr Bild oder die Netzhaut bewegt werden. Es versteht sich von selbst, dass durch eine derartige Sonderung der Bilder auch ihre verschiedene Stärke, ihre Maxima und Minima im Leuchten sich verrathen würden. Diese Minima können nun, wie wir eben vorausgesetzt, null werden; sie können aber auch einen Werth haben.

Wheatstone [13]) war der erste, der bei Gelegenheit der Messung der Geschwindigkeit der Elektricität im Kupferdrahte die singende Flamme optisch analysierte (1834). Er ließ das Bild einer Wasserstoffflamme auf den rasch rotierenden Spiegel seines Apparates fallen und erhielt einen leuchtenden Kreis. Sobald er aber ein Rohr über die Flamme brachte und so eine chemische Harmonica herstellte, beobachtete er im umlaufenden Spiegel Unterbrechungen in der Lichtstärke der Flamme, welche den Schwingungen der Flamme entsprachen. Tyndall [14]) nahm (1857) diesen unbeachtet gebliebenen Versuch wieder auf. Zunächst analysierte er den optischen Zustand der Flamme durch Bewegung der das Bild auffangenden Netzhaut. Wenn er im Finstern den Kopf hin und her schob, so löste sich das Einzelbild in eine Reihe von einander gesonderter Bilder auf. Die trennenden Zwischenräume waren um so größer, je schneller der Kopf

bewegt wurde. So verhielt es sich auch, wenn das Bild der Flamme dadurch geschwungen wurde, dass mittelst eines schnell hin- und herbewegten Opernglases nach der Flamme gesehen wurde. Ferner warf Tyndall im Dunkeln mittelst einer Sammellinse das Bild der ruhigen Flamme auf einen kleinen Spiegel und von da auf einen weißen Schirm. So lange die Flamme nicht tönte, zeigte sie im rasch umlaufenden Spiegel oder auf der Wand ein continuirliches Lichtbild, eine ununterbrochene Lichtlinie. Wie aber die Flamme tönend gemacht wurde, erschienen auf der weißen Wand eine Reihe von Flammenbildern mit dunklen Unterbrechungen, die um so weiter abstanden, je rascher gedreht wurde. So kam es auch, als Tyndall den vorigen rotierenden Spiegel durch ein dreiseitiges, an seinen Seitenebenen mit Spiegeln versehenes Prisma ersetzte. Dasselbe hing scheitelrecht an einem Faden. Vermöge der Torsion an dem letzteren wurde diese Spiegelvorrichtung um die Längenaxe gedreht.

Tyndall hält bei Anwendung einer Flamme von ölbildendem Gas oder Leuchtgas den dunkeln Raum zwischen den Flammenbildern für eine sehr schwache Beleuchtung, welche von dem blauen Lichte des Kohlenoxydgases herrührt, indem bei den successiven Explosionen, mithin raschen Verbrennungen auch der Kohlenstoff vollkommen verzehrt wird. Wenn man (nach Tyndall) eine sehr kleine zum Tönen bestimmte Flamme von ölbildendem oder auch Leuchtgas erzeugt und so lange sie noch nicht singt, analysiert, so erscheint eine stetige Lichtlinie; wie man aber die Flamme durch einen äußeren Ton zum Antworten anregt, so verlängert sie sich, wird dabei weniger leuchtend bis zur Spitze, welche jetzt glänzt. Bei der Auflösung dieser singenden Flamme mittelst des rotierenden Spiegels nimmt man eine Reihe durch dunkle Räume geschiedener Lichtpuncte wahr und es ist gerade so, als ob eine Reihe glänzender, herrlicher Perlen zu sehen wäre. Jede Perle dieser Schnur hat vorne ein Lichtsternchen, hinten aber in reichlichem Maße an die Perlen anschliessend, blaues Licht. Der Versuch bietet eines der schönsten Phänomene.

Die optische Analyse der Flamme gelingt nach Tyndall leichter bei etwas größeren Flammen. Er bediente sich einer Röhre von 2′ 3″ (engl.) und mit noch besserem Erfolge von 6′ 9″. Für die Auflösung in eine Perlenschnur diente die kleine Röhre. Die Sammellinse hatte 33cm Brennweite und der Schirm stand 6 bis 8′ von der Flamme ab. Das Rohr war auf der zum Schirm gewendeten Seite bis auf die Stelle für die Flamme geschwärzt. — Die glänzenden Sternchen an den Flammenbergen sind die glühenden Kohlentheilchen.

In ähnlicher Weise analysierten später auch Schaffgotsch [15]), Grailich und Weiss [16]) das optische Verhalten der Flamme. Für die optische Analyse durch Kopfbewegung empfiehlt Schaffgotsch ein starres Blicken nach der Flamme; für die Auflösung mit dem Spiegel aber ein rasches Hin- und Herbewegen eines kleinen Handspiegels oder eines Spiegelstückes. Grailich und Weiss bedienten sich eines vierseitigen Prisma's, welches auf jeder Seite mit einem Planspiegel bedeckt war. Die Drehung desselben ward mit der Hand bewirkt oder durch Anlassen mittelst Abwickelns einer Schnur, ähnlich wie ein Kreisel, ein Fessel'scher oder Bohnenberg'scher Apparat in Rotation gesetzt wird.

Roger's [17]) untersuchte die Phasen der singenden Flamme, indem er das Flammenröhrchen drehbar und dabei dennoch gasdicht herrichten ließ. Dieses Röhrchen war äußerlich mit einer kleinen Rolle versehen, um welche eine Schnur zu einem Rädchen ging, von dem aus die rasche Drehung vermittelt wurde. War an dem drehbaren Gasröhrchen die singende Flamme hergestellt, so erfolgte bei Umdrehung dieser Flamme, die Auflösung wie bei Tyndall. Je schneller man drehte, desto schwächer erschien der Ton. Bei sehr rascher Umdrehung hörte jeder Ton auf, das Flammenbild wurde dann stetig, die Flamme zeigte sich regulär. Für diese Erscheinung fehlt noch die Erklärung. Jedenfalls dürfte die Centrifugalkraft irgend eine Rolle spielen, welche noch zu untersuchen bleibt. Ob hier bei so raschem Umlaufe das Rohr ein kleines Centrifugalgebläse bildet, dem das Gas von innen und die Luft von außen so rasch zuströmen, dass keine Unterbrechungen entstehen können, oder ob die Schwingungen in der Röhre durch einen stärkeren, vermöge

der Fliehkraft bewirkten Luftzug mechanisch zerstört werden — dies und noch mehreres bleiben offene Fragen. Überhaupt könnte dieser Umstand ein Ausgangspunct für eine Versuchsreihe werden, welche am ehesten zu einer bestimmten Erklärung der chemischen Harmonica führen würde.

Eine zweite sehr sinnreiche, auf dem bekannten taumatropischen Princip beruhende Methode Rogers[18]), die tönende Flamme in ihre Zeitelemente zu zerlegen, war folgende: Eine schwarze, um eine wagrechte Axe drehbare Kreisscheibe wurde am Rande mit einem Stückchen oder radial mit einem Streifen weißen Papiers beklebt. Wenn die Harmonicaflamme nicht tönte und sie auch nicht gedreht wurde, jene Scheibe aber in raschem Laufe sich befand; so waren der weiße Papierfleck oder der Streif nicht zu sehen, aus dem nämlichen Grunde, aus welchem nicht die einzelnen Farbenstreifen, sondern nur die Mischfarben an dem bekannten Farbenkreisel wahrzunehmen sind. Wie aber die Flamme zum Tönen, also zum Intermittieren gebracht wurde, so zeigte sich für's Auge die umlaufende Scheibe am Rande belegt mit gleichweit von einander abstehenden weißen Flecken oder radialen Streifen, welche je nach dem Verhältnisse der Umlaufsgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit der Tonschwingungen ruhig zu sein, nach rechts oder links zu rotieren schien.

1. Die akustische Empfindlichkeit einer tönenden Flamme und deren optische Analyse, mahnen an das ähnliche Verhalten des nicht zusammenhängenden Theiles eines ausfließenden Flüssigkeitsstrahles. Auch bei diesem ändern, nach Savart [19]), die Elemente des unterbrochen fließenden Stückes ihre Gruppierung durch den Ton einer Stimmgabel, und das optische Studium beruht ebenfalls auf taumotropischen Grundsätzen.

Mateucci[20]) machte die Unterbrechung, die sich unter zweifelhaften Umständen wegen der Nachdauer der Bilder der fallenden Tropfen auf der Netzhaut nicht zeigen kann, dadurch ersichtlich, dass er den Wasserstrahl mit einem kräftigen elektrischen Funken momentan beleuchtete. In dieser unendlich kurzen Zeit ändern die Elemente des Strahles ihren Ort nicht wahrnehmbar. Der Strahl erscheint wie ruhig und die Unterbrechungen können gesehen werden, gerade so wie die Speichen eines rasch umlaufenden Rades oder die Streifen eines schnell rotierenden Farbenkreisels sich gesondert zeigen, wenn sie ein elektrischer Funke erhellt.

Billet-Gelis[21]) fixierte im optischen Sinne den Ausflussstrahl dadurch, dass er ein verkehrtes Bild desselben mittelst eines Hohlspiegels herstellte. War die Anordnung so getroffen, dass das directe Bild des Strahles und jenes des Sammelspiegels auf die nämliche Stelle der Netzhaut fielen, so schien der Strahl ruhig und seine Unterbrechungen konnten studiert werden. In ähnlicher Weise aber minder einfach hatte schon früher Savart[22]) den Strahl optisch dadurch fixiert, dass ein langes schwarzes Band, belegt mit schmalen weißen Streifen, hinter dem Wasserstrahl in entgegengesetzter Richtung, d. i. aufwärts gezogen wurde. Der Wasserstrahl zeigte sich so lange schwarz, bis das aufsteigende Band die mittlere Geschwindigkeit des fallenden Strahles hatte. Dann konnte man die weißen Streifen sehen und der Wasserstrahl erschien wie ruhend.

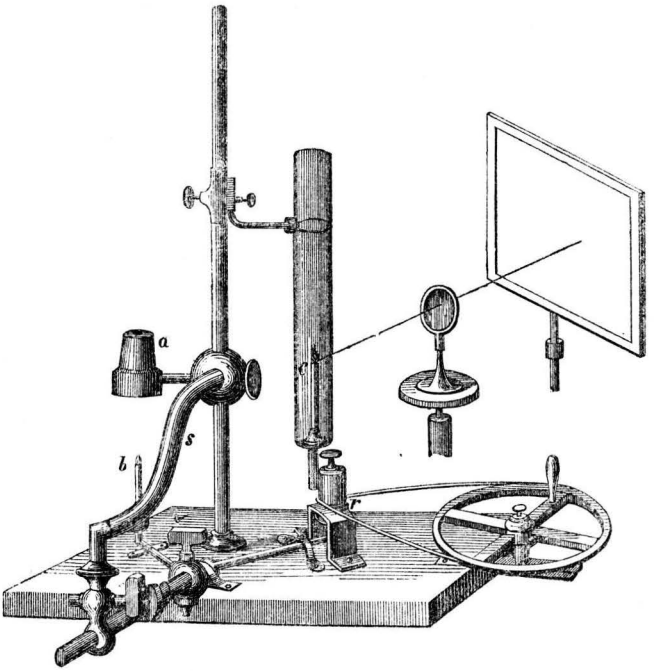
2. Durch ein schnelles Hin- und Herbewegen der Loupe hat (1850) auch Montigny[23]) ein Vibrieren der Quecksilbersäule im Barometer bemerkt, wenn in der Kathedrale zu Antwerpen die Glocke geläutet wurde. Montigny findet die Ursache in der Resonanz. Die Säule hatte nach seiner Berechnung eine Länge, bei welcher sie mittelst Längenschwingungen die Quinte des Grundtones der Glocke gibt. Ältere ähnliche Versuche (1773) von Pigolt und Englefield in Brüssel, und von Montigny neuen Datums zu Namur waren ohne Erfolg geblieben.

91. Zusammenfassung. Einfachster Apparat für die singenden Flammen. Wie aus dem bisher Vorgetragenen einleuchtet, sind die Mittel zum Studium der singenden Flammen die allereinfachsten. Selbst der Laie der physikalischen Wissenschaft kann mit einiger Bemühung das Vergnügen haben, dass ihm die Flammen gehorchen! sich seinem Zurufe beugen. Bedarf es doch nur einer kleinen Gasflamme, einiger Glasröhren von verschiedener Länge und Weite, d. i. von verschiedener Tonhöhe bezüglich der von ihnen umschlossenen Luftsäule, einer Stimmgabel oder einer gewöhnlichen Gesangsstimme und des ersten besten Spiegelscheibchens zum Schwingen, d. i. zur Analyse der singenden Flamme! In Städten mit Gasbeleuchtung bedient man sich einer sehr kleinen Leuchtgasflamme. Und wo kein Leuchtgas zu haben ist, entwickelt man Wasserstoffgas. Etwas Eisenfeile oder Zinkklein und ein wenig Schwefelsäure kann sich Jedermann leicht verschaffen. Nun richtet man die „chemische Harmonika“ nach den Angaben des ersten besten Lehrbuches der Chemie her und die meisten der bisher erwähnten schönen Versuche können wiederholt werden.

Im Allgemeinen gilt (wie schon öfters erwähnt) je kleiner die Flamme, desto leichter tritt das Tönen ein. Die Weite der Ausflussmündung kann von 0·5mm bis höchstes 3mm variiren. Ölbildendes Gas verlangt eine engere Ausmündung als dieses Maximum. Breitere Flammen bewirken eher Tönen als längere.

92. Der Tonflammen-Apparat von Schaffgotsch. a) Einen solchen (Fig. 84) hat Schaffgotsch[24]) für größere Gasquel-

Fig. 84.



len construiert. Man sieht hier eine dreifache Auszweigung von kleinen Gasröhren. Die gläsernen Klangröhren sind in Hältern befestigt und an einem lothrechten Stabe beweglich. Der 25löchrige Brenner oder ein sehr schmaler Spaltenbrenner *a* kann ebenfalls, als an einem elastischen Zuleiter *s* befestigt, an dem Stabe auf- und abwärts geschoben werden. Die Flammen der einlöchrigen Brenner können mittelst des Hahnes reguliert, und durch engere oder weitere Aufsätze beliebig variirt werden. Auch lassen sich 2 Röhren zugleich ansprechen. Der weite

Brenner *a* gestattet ein Versuchen mit breiten Flammen. Liegt der linke, schmale Brenner *b* innerhalb des weiten Brenners *a*, so lässt sich die kleine Flamme des schmalen Brenners und der Abstand beider Flammen so regulieren, dass bei nicht singenden Flammen der aus dem weiten Brenner *a* kommende Gasstrom unentzündet bleibt. Sobald aber die kleinere Flamme des schmalen Brenners zum Tönen angeregt und dadurch verlängert wird, erreicht und entzündet sie den oberen Gasstrom, wobei sie selbst, wenn der äußere Ton genügend stark war, verlischt. Das ausströmende Gas entzündet sich aber bald wieder an der oberen Flamme. Der von König in London ausgestellte Apparat war genau nach der Angabe des Erfinders Schaffgotsch verfertigt.

b) Der hiesige Mechaniker Herr Hauck hat behufs der Auflösung der Flammenbilder nach dem oben besprochenen Principe von Rogers (pg. 180) den rechten Gasarm des Tonflammen-Apparates von Schaffgotsch (Fig. 84) leicht und rasch drehbar eingerichtet. Die Anordnung des Versuches zeigt die Fig. 84. Auch hier erscheint eine Reihe von Flammenbildern, geschieden durch dunkle Räume. Mit dem „Tonflammen-Apparat“ lassen sich alle Versuche über die „singenden Flammen“ nach Schaffgotsch, Tyndall und Anderen nicht nur wiederholen, sondern mannigfach abändern und variiren.

93. Ältere Geschichte der chemischen Harmonica[25]). Higgins[26]) entdeckte 1777 die Erscheinungen bei der chemischen Harmonica, als er die Wasserbildung in einem Glasgefäße bei der Verbrennung eines schwachen Wasserstoffstromes studierte. In Deutschland wurde diese Thatsache zuerst durch de Luc[27]) und in weiteren Kreisen durch Hermbstädt[28]) und Mussin Puschkin[29]) bekannt. Letzterer leitete das Tönen aus einer Reihe einander rasch folgender Explosionen ab, ohne dass die Theilchen der Wände des Rohres mitschwingen, indem man letzteres beliebig umhüllen könne, ohne die Tonhöhe zu ändern. Scherer[30]) hatte ebenfalls die Explosionen als erste Ursache angenommen, aber das Mitschwingen der Wandtheilchen gel-

ten lassen. Durch Puschkin's Einwendung aufmerksam gemacht, veränderte er den Versuch, bezüglich der über der Flamme zu begrenzenden Luftsäule, in der mannigfachsten Weise, indem er beiderseits offene und einerseits geschlossene Röhren, Kolben, Flaschen von der verschiedensten Form verwendete. In der That blieb die Tonhöhe von der Umhüllung dieser Gefäße unabhängig. Scherer nahm später an, dass durch die Verbrennung zum Theil ein Vacuum entstehe, in welches die Luft mit großer Gewalt eindringe und den Ton hervorrufe. Dass Chladni[31]) ein so interessantes Factum nicht unstudiert lassen werde, war vorauszusehen. Nach der ihm eigenthümlichen, gründlichen Verfahrungsweise hatte er eine größere Reihe von Versuchen in dieser Richtung angestellt, und kam zu dem wichtigen Resultate: Die chemische Harmonica sei eine Pfeife, die Gesetze dieser gelten daher auch für jene. Chladni machte seine Versuche mit eingehüllten Röhren aus verschiedenen Materien, von verschiedenen Dimensionen und Weiten. Die letzteren fand er ohne Einfluss. Die Deckung wirkte wie bei einer gewöhnlichen Pfeife. Die Ursache der Vibrationen der tönenden Luftsäule kann unmittelbar in der Flamme, in der Strömung des sich entwickelnden Wasserstoffgases und vielleicht auch im Luftzuge in der über der Flamme gestülpten Röhre liegen. De la Rive[32]) glaubte, durch Verbrennung des Wasserstoffes bilden sich Wasserdämpfe, welche die Luft aus dem Rohre vertreiben. Wenn dann diese Dämpfe condensiert werden, so tritt heftig Luft ein, welche wieder durch die entstehenden Wasserdämpfe hinausgetrieben werde, worauf sich das Spiel wiederholt.

De la Rive's Ansicht wurde (1808) von Faraday[33]) widerlegt. Zunächst zeigte letzterer, dass der Ton auch auftrete, wenn die Harmonicaröhre über 100°C. warm ist, mithin von einer Condensation der Wasserdünste keine Rede sein könne. Sodann verwendet er eine Kohlenoxydflamme, bei welcher keine Wasserbildung möglich ist. Überhaupt hat Faraday den Versuch, sowohl was die Flammen als die Röhren betrifft, auf das mannigfaltigste variirt. Er prüfte fast alle brenn-

baren Gase, wie auch Äther und Alkoholdünste mit Erfolg; jedoch gab der Wasserstoff stets am leichtesten den Ton. Eben so kamen Röhren und Gefäße über die Flamme von der mannigfaltigsten Form, Größe und Materie (darunter auch aus Pappe, aus zusammengerolltem Papier) zur Anwendung, und die Flammen bewirkten ein Tönen. Faraday erklärte das Phänomen aus rasch aufeinander folgenden Explosionen. Zuerst entstehe ein Luftzug in der Röhre, der die Flamme schmäler mache, und dies um so mehr, je schneller der durchziehende Luftstrom ist. Der Sauerstoff dieser Luft mische sich mit dem noch unverbrannten Wasserstoff. Dieses Gemenge detoniere, worauf der Vorgang sich baldigst wiederholt. In gleicher Weise verhalte es sich mit den andern, rasch verbrennenden Gasen und Dünsten. Der Wasserstoff sei am tauglichsten, weil durch die grosse, bei seiner Verbrennung entstehende Hitze die Luft geschwinder herbeiströmt und weil seine Flamme schwerer auslischt.

Der rollende, tiefe Ton, welcher beim Hineinblasen in eine Flamme zu vernehmen ist, wird von Faraday für ein Analogon der in Rede stehenden Erscheinungen angesehen. Er erklärt ihn als Folge schnell nach einander kommender, kleiner Explosionen. Martens[34]) glaubt, dass das explodierende Gasgemenge etwas über der Flamme sich befinde; denn bei Einführung eines Davy'schen Drahtnetzes ober der Flamme, unweit von letzterer, hört das Tönen auf. Davy[35]) selbst brachte seine Sicherheitslampe in ein explodierendes Gasgemenge und erhielt einen Ton durch die in der Lampe rasch erfolgenden Detonationen. Noch vor Faraday hatte Zennek[36]) eine größere Arbeit über die chemische Harmonika geliefert, in der eine gut brauchbare Tabelle sich findet, bezüglich der Dimensionen der Röhren und des zugehörigen Tones. Er verwendete auch Röhren mit verschließbaren Seitenlöchern, wie bei den Flöten und erhielt, wie vorauszusehen, wechselnde Tonhöhen.

Mögen die Schwingungen durch Explosionen oder durch den Zug ursprünglich erreicht werden (denn hierauf kommen die vielen Hypothesen in letzter Instanz zurück); so regeln sie

sich, sobald es zum Tönen kommt, doch so weit, dass im Ganzen, Grossen, wie Chladni sogleich erkannte, das Pfeifengesetz gilt. Die höhere Temperatur, die Größe der Flamme und andere Umstände können nur modificierend wirken, etwa wie bei gewöhnlichen Pfeifen die Form, Größe und Länge des Mundloches. Wenn die Wände der die Flamme umgebenden Röhre mit Wasser überzogen sind, hören sie auf zu tönen. Chladni glaubt, dass entweder die Schwingungen der Luft durch die Wassertropfen gehemmt werden, oder dass die Schwingungen in einer Mischung von Luft und Dunst unmöglich sind. Dieser Punct bliebe noch im Vergleiche mit den gewöhnlichen Pfeifen zu untersuchen und endgiltig zu erklären.

Wir sehen, dass die chemische Harmonika schon frühzeitig vielseitig beobachtet wurde. So waren nicht nur alle Arten brennbare Gase versucht worden, sondern Brugnatelli[37]) hatte den Ton der chemischen Harmonika sogar mittelst verbrennenden Phosphors hervorgerufen und Pictet[38]) hat den Schwingungszustand der Röhre mittelst der Bewegung von Rauchsäulen zu beobachten gesucht (vergl. pag. 176).

Auf ein Studium des Phasenzustandes der Flammen (§. 90) war vor Wheastone (1834) Niemand gekommen; jedoch hatte Tromsdorf schon frühzeitig aufmerksam gemacht, dass die Flamme sich verlängere und zuspitze, sobald der Ton beginnt. Auch an kleineren Mittheilungen hat es nicht gefehlt. So z. B. fand (1827) Geiger[39]), dass eine gewöhnliche kleine Medicinflasche, wenn sie $^3/_4$ mit Wasserstoff gefüllt, hierauf umgekehrt und das Gas angezündet wird — tönt. Ganz das nämliche fand 1855 Böttger[40]). Hiedurch ward neuerdings bestätigt, dass Leuchtgas sehr gut zur chemischen Harmonika dienen könne.

De la Rive[41]) glaubte seine oben erwähnte Ansicht durch folgenden netten Versuch stützen zu können: Eine gläserne Kugel mit einem angeschmolzenen langen Haarröhrchen enthält einige Tropfen Wasser. Erhitzt man die Kugel, so lässt sich ein Ton vernehmen, welcher dem der chem. Harmonica ähnlich ist. Der Ton wird um so tiefer, je größer die Kugel, je länger und enger die Röhre ist. Die entweichenden Dünste condensieren sich im kälteren Haarröhrchen, uud in Folge dessen strömt Luft von aussen heftig ein. Diese wird wieder durch die neu entstehenden Dünste ausgetrieben,

stürzt aber in Folge der abermaligen Condensation wieder herein u. s. w., wodurch der Ton entsteht. In gleicher Weise verhält es sich bei Anwendung einiger Tropfen Äther, Alkohol und Quecksilber.

Bei einer größeren Menge von Flüssigkeit entstehen zu viel Dünste. Die Röhre wird ebenfalls durch die vielen Dünste warm und das Phänomen kann nicht eintreten. Wenn alle Flüssigkeit verdunstet ist, hört die Erscheinung uuf, beginnt aber wieder bei späterer Erwärmung, wenn die condensierten Flüssigkeiten nach der Erkaltung in die Kugel geflossen sind. Pinaud [42]) bestätigte de la Rive's Erklärung, indem eine wohl ausgetrocknete Kugel keinen Ton gebe.

Marx [43]) und Sondhaus [44]) haben jedoch gezeigt, dass die Gegenwart der Wasserdämpfe für das Entstehen eines Tones nicht unbedingt nothwendig sei. Nach ersterem entsteht der Ton durch die Stöße, welche die entweichende erhitzte Luft auf die äußere Luft übt und ist also ein Analogon der Lochsirenen. Nach Sondhaus wird die Erscheinung bei solchen „erhitzten Kugeln und Röhren" auf die Erscheinung bei gedeckten Pfeifen zurückgeführt, nur dass hier die Luft statt verdichtet verdünnt wird. Das Dasein hochgespannter Dämpfe von Wasser, Weingeist und im minderen Grade von Äther begünstigten das Zustandekommen des Tones; ja selbst bei Quecksilberdämpfen hat Sondhaus noch einen Ton erhalten. Das Glas kann während des Tönens an beliebigen Stellen berührt werden, ohne den Ton zu ändern. Vibrationen des Glases sind also nicht Ursache des Tones. Zu ähnlichen Resultaten wie Marx und Sondhaus gelangt auch Emsmann [45]). Die beiden ersteren und Pinaud haben überdies die Bedingungen für die Höhe des Tones aufgesucht [46]).

Ich habe ähnliche Versuche angestellt und auch hier die Chladni'schen Erfahrungen (pg. 187) in jeder Beziehung bestätigt gefunden. Ich verwendete enge Glasröhren, welche an einem Ende retortenförmig (mit einer kleinen kugelförmigen Erweiterung von nahezu 12^{mm}) aufgeblasen worden waren. Wenn ich den oberen offenen Theil der 4^{mm} weiten Glasröhren mit einem Zündhölzchen im Innern nur sehr schwach angenässt hatte und dann die Kugel der Röhre über einer Weingeistflamme erhitzte, so trat ein kräftiges Tönen hervor, welches noch lange anhielt, nachdem die Röhre von der Wärmequelle entfernt worden war. Wenn jedoch die Benetzung der oberen Innenwand zu stark war oder wenn der untere Theil der Röhre oder die Kugel, kurz die dem Feuer nahen Theile im Inneren nass geworden waren — so konnte ich die Röhren nicht zum Tönen bringen.

94. Neuere Geschichte der chemischen Harmonica. Das Interesse für die chemische Harmonica war nach diesen vielseitigen, in früherer Zeit angestellten Studien auf ein gewöhnliches Maß zurückgekommen, bis in neuerer Zeit (1857) Graf

Schaffgotsch die Aufmerksamkeit der Naturforscher wieder auf diesen Gegenstand lenkte.

Wir haben oben (§. 89, pg. 172) die bezüglichen Arbeiten des Entdeckers selbst und Tyndall's in den Hauptzügen wiedergegeben, und werden hier die Skizze der einschlägigen Studien und Beobachtungen fortsetzen.

Professor Schrötter[47]) beobachtete (1843 und 1857) bei der singenden Wasserstoff-Flamme an der Mündung des Gasrohres eine in das letztere hineinbrennende blaue, nur im Finstern wahrnehmbare und eine äußere gelbe Flamme. Er erklärt diese Erscheinung und mit ihr die Entstehung des Tones wie folgt: Im Harmonikarohr entsteht durch die von der Flamme kommende Wärme ein Luftstrom, welcher die Ausflussgeschwindigkeit des Gases vergrößert, und welcher, weil das Gas sich nicht so rasch entwickelt, im Gasentwicklungsraume eine Gas-Verdünnung bewirkt.

In Folge dessen wird atmosphärische Luft gegen und in die Ausflussöffnung gesaugt und die Flamme brennt hinein. Dieses Zurückbrennen scheint zwar constant zu sein; es ist aber eigentlich ein Hinein- und Herausschwingen der Flamme, das sich jedoch wegen der Nachdauer auf der Netzhaut als ein constantes Nebeneinanderbrennen von zwei Flammen (der blauen und gelben) zeigt. Das hypothetische, nicht sichtbare, durch das taumatropische Princip gestützte Hinaufschlagen der Flamme, leitet Prof. Schrötter davon her, dass die im Ausflussrohr brennende blaue Flamme auch als Sauger auf das Gas im Entwicklungsgefäße wirkt. In Folge dieses stärkeren, inneren Gasdruckes und des äußeren Zuges hebt sich die Flamme, worauf das Spiel von neuem beginnt. Dieses Auf- und Niederflammen ruft in der Röhre in ähnlicher Weise einen Ton hervor, wie eine tönende (vibrierende) Gabel, Platte oder dgl., vor der Mündung eines Pfeifenrohres. Prof. Schrötter hält dafür, dass alles, was die Entstehung der inneren Flammen hemmt, auch das Tönen hindere. Weil nun bei der Verbrennung von Schwefelwasserstoffgas die gebildete schweflige Säure in die Röhre tritt und hier das Zurückbrennen hindere, so sollte

eine Schwefelwasserstoffgas - Flamme kein Tönen bewirken. Schrötter glückte es auch nicht, mittelst einer solchen Flamme ein Tönen hervorzurufen. In der That spricht die Schwefelwasserstoff-Flamme nur sehr schwierig an, wie Sondhaus[48]) gezeigt hat. Die Öffnung des Ausflussrohres muss für dieses und jedes Gas, deren Flammen nicht leicht das Tönen bewirken, viel enger als für Wasserstoff sein. Eine mit der ausströmenden Spitze verbundene Platinspirale, welche das Davy'sche Glühphänomen zeigt, kann nach Schrötter dienen, das Auslöschen der singenden Flamme zu verhüten.

Herr Professor Schrötter theilte mir mit, dass es auch ihm später gelungen sei, unter den zuletzt angegebenen Bedingungen die Röhren mittelst einer Schwefelwasserstoff-Flamme zum Tönen zu bringen.

Grailich und Weiss[49]) haben (1858) gezeigt, dass das Zurückbrennen der Flamme in die Röhre zum Auftreten des Tones nicht nothwendig, sondern dass es nur eine Nebenerscheinung sei, und von der Weite der Ausströmungsöffnung, wie auch von der Stärke und Höhe des Tones abhänge. Der blaue Antheil der Flamme schlägt bei etwas weiteren Mündungen, wie eine feurige Cascade auch von außen um die Ausflussröhre. Im Allgemeinen ergibt sich bei engeren Öffnungen ein geringeres Zurückschlagen der Flamme. Röhren mit sehr engen, konisch auslaufenden Mündungen gestatten das Zurückflammen gar nicht. Das Zurücktreten der Flamme erfolgt beim Wasserstoff um so mächtiger, je schneller er ausströmt, beim ölbildenden Gase verhält es sich innerhalb gewisser Grenzen umgekehrt. Je stärker und tiefer der Ton ist, desto kräftiger scheint das Zurückschlagen.

Grailich und Weiss haben auch den Phasenzustand der Flamme studiert (§. 90) und eine Reihe schlanker Flammenbilder bekommen. Es scheint nach ihnen, dass die Flamme nirgends unterbrochen sei, worüber nur hinsichtlich der glühenden Ausflussöffnung ein Zweifel entstehen könnte. Es ist aber unwahrscheinlich, dass diese Stelle vom Gas unentzündet passiert werde. Wenn die gewöhnliche Ausflussöffnung geschlossen wird und das Gas seitlich ausströmt, so zeigt die Ana-

lyse der Phasenstände der Flamme ein ununterbrochenes Flammenbild; im Ganzen genommen ein Flammen-Zickzack.

Grailich und Weiss schloßen hieraus, dass die Ursache des Tönens bei der chemischen Harmonika nicht in successiven Explosionen zu suchen sei; sie liege vielmehr in den bedeutenden, fortwährend einander folgenden Volumänderungen, welche sich bei der Verbrennung erzeugen, indem die Producte der Verbrennung von Gasen dichter seien, als die unverbundenen Gase und diese dann, wie successive Explosionen eine „Unruhe“ in der Harmonikaröhre bewirken, welche die Schwingungen anregen, die sich endlich zu stehenden Vibrationen anordnen. Hierbei kann auch der durchziehende Luftstrom mitwirken.

Der Schwingungszustand in der Harmonikaröhre selbst wurde mit einem zweiten verschiebbaren Flämmchen studiert. Dieses Sonderflämmchen ist nur bei horizontaler Lage der zu untersuchenden Röhren verwendbar, weil es sonst durch den starken Luftzug ausgelöscht wird. Zum Tonerregen muss eine starke Wasserstoff-Flamme genommen werden, während zum Sondieren ein trägeres Flämmchen, z. B. vom Leuchtgas gewählt wird, welches man aber erst, wenn es an die zu untersuchende Stelle gebracht worden ist, anzündet. Bei den Versuchen von Grailich und Weiss brannte das Flämmchen nur in der Mitte der Harmonikaröhre und erlosch sogleich, wenn man es verschob. Um es sicherer brennen zu machen, ward überdies Sauerstoff durch die Harmonikaröhre geleitet.

Bald nach dem Bekanntwerden der chemischen Harmonika suchte man das Experiment auf die gewöhnlichen Kerzenflammen auszudehnen, jedoch ohne Erfolg. Rogers[50]) versuchte (1858) den Ton mit Dochtflammen zu erzeugen. Im Allgemeinen ist es schwierig, einen continuirlichen Ton zu erhalten und es bedarf einiger Kunstgriffe. Hohle Dochte eignen sich besser als massive. Solche geben mit Alkohol, Schwefeläther und einer Mischung von Spiritus und Terpentinöl, bei Anwendung enger Röhren, andauernde Töne. Umgekehrte Drahtnetz-Gasbrenner erzeugen nach Schaw [51]) einen starken Ton, wenn

der Gaszufluss nicht zu stark ist. Noch nicht tönende Leuchtgasflammen können nach Rogers, wenn sie rasch hin- und herbewegt werden, das Tönen hervorrufen. Es entsteht dann, wie Rogers annimmt, ein Gemisch des Gases mit der Luft, aus dem successive Explosionen hervorgehen. Das besondere Durchtreiben eines Luftstromes kann ebenfalls die noch schweigende Flamme zum Tönen bringen. Rogers findet als letzte Ursache der Erscheinung die periodisch-explosive Verbrennung der Gase. Auch Peterim und Weiss[52]) haben (1858) eine Versuchsreihe bezüglich des Tönens der Flammen flüssiger und fester Körper geliefert. Die Flüssigkeiten brannten aus Dochten oder engen Röhren. Im Allgemeinen ist eine Ausbreitung der Flamme und des Dochtes und die Anwendung weiter Röhren den Versuchen günstig; besonders bei den verschiedenen Arten der Kerzen. Eine Stearinkerze musste dünner geschabt werden, damit der Ton entstehe. Äther, Terpentin- und Steinöl tönten im Ganzen genommen unregelmäßig, Weingeist gut, Brennöl recht gut. Damit stimmt auch eine Beobachtung (1861) von Reinisch[53]), nach welchem die Öl-Flamme einer Argandlampe in einer Glasröhre, (1·6^{m} Länge und 25^{mm} Weite) zu singen begann.

Ein eingehendes Studium der chemischen Harmonica verdanken wir neueren Datums (1860) Dr. Sondhaus[54]). Die Versuche wurden mit „Klang-Röhren" besonders aus Pappe von sehr verschiedenen Dimensionen angestellt. Dr. Sondhaus ist der Ansicht, dass die Hauptursache für das Tönen vermittelst Flammen in den Oscillationen der im Ausflussrohre enthaltenen Gassäule liege. Diese Schwingungen bewirken durch Stöße, welche sie auf die im Klangrohre befindliche Luft äußern, dass letztere in's Tönen geräth. Um dies nachzuweisen, wurden die Ausflussröhren bis zu verschiedenen Höhen mit Baumwolle verstopft und dadurch die Länge der Oscillationen der durch die Baumwolle strömenden Gassäulen zweckentsprechend abgeändert. Sondhaus zieht aus seinen mitgetheilten, werthvollen Versuchs-

tabellen einen Schluss, der seine oben ausgesprochene Ansicht bestätigt.

Demnach käme die ganze Erscheinung bei der chemischen Harmonica auf jene bei den Zungenpfeifen zurück, was Sondhaus noch durch eigene Versuche zu bekräftigen sucht.

Vergleiche dagegen die voranstehenden Versuche von Peterin und Weiss und die nachfolgenden von Rijke und Riess (§. 95); siehe auch die oben besprochene Ansicht des Prof. Schrötter über die chemische Harmonica.

Außer obigem Hauptergebnis kommt Sondhaus noch auf eine größere Anzahl interessanter Thatsachen, von welchen hier nur angeführt sein mögen:

1. Die mittleren Längen der tönenden Klangröhren sind nahezu proportional den Längen der Luftsäulen im Ausflussrohr. Dieser Schluss wird aus den Tabellen über die Versuche mit den nicht gestopften und gestopften Ausflussröhren gezogen. Die Entfernung der Stopfung von der Spitze des Ausflussrohres beträgt bei diesen Versuchen (wie der Referent in den Berliner Berichten, „Fortschritte der Physik im Jahre 1860" aufmerksam macht) beiläufig das Doppelte einer halben Wellenlänge der Klangröhre.

2. Bei derselben Ausflussröhre und bei verschiedenen Gasen verhalten sich die mittleren Längen der tönenden Klangröhren nahezu wie die Quadratwurzeln aus den specifischen Gewichten der ausströmenden Gase.

3. Mittelst der gestopften Ausflussröhren, deren Flammen weniger empfindlich sind, also nicht leicht auslöschen, lassen sich leicht Flageolettöne in der Klangröhre erregen, deren Höhe je nach der Lage der Stopfung und des Ortes der Flammen in der Klangröhre verschieden sind.

Wir machen hier noch auf den von Sondhaus bei diesem Versuch gebrauchten Gasapparat aufmerksam, mittelst dessen sich Combinationstöne ganz ungewöhnlich deutlich hervorrufen lassen.

95. Tönende Luftsäulen, angeregt durch glühende Drahtnetze. a) In hohem Grade interessant ist folgender, von Rijke[55]) in Leyden (1859) angestellte Versuch. In eine Glasröhre wurde

im unteren Theile, etwa im Viertel der ganzen Röhrenlänge, ein Drahtnetz mit engen Maschen so gebracht, dass es federnd an der Glaswand hielt. Wenn man dieses Drahtnetz mittelst einer Alkohol- oder Wasserstoff-Flamme bis zur Rothgluth erhitzte und dann die Wärmequelle entfernte, so ließ sich einige Secunden hierauf ein Ton vernehmen, der etwas höher als der Grundton der Röhre war und nur einige Secunden währte. Der Ton dauerte länger an, wenn mehrere Netze gleichzeitig verwendet worden waren. Beim Decken der oberen Mündung hört der Ton augenblicklich auf, tritt aber um so stärker hervor, wenn oben wieder geöffnet wird. Der Ton ist permanent, wenn man das Drahtgeflecht mittelst einer galvanischen Batterie (wenigstens von 30 Grove'schen Elementen) dauernd in Gluth erhält.

Die Schwächung und Stärkung des galvanischen Stromes mittelst eingeschalteter Drähte von Rheostaten oder Widerstandsrollen und das Unterbrechen des Stromes bewirken, je nachdem das Glühen des Drahtes dadurch herabgesetzt oder erhöht wird, eine Schwächung, ein Aufhören oder eine Verstärkung des Tones. Die Ursache aller dieser Erscheinungen liegt offenbar hier darin, dass der aufsteigende kalte Luftstrom am heißen Drahtgitter plötzlich ausgedehnt, und oberhalb dessen bald wieder verdichtet wird. Diese abwechselnden Volumsveränderungen bewirken das Tönen.

1. Das Netz von Rijke war aus Eisendraht, letzterer 0·2^{mm} dick, 81 Maschen auf 1 □^{cm}. Die Röhre war 0·8^{m} lang, oben 37^{mm}, unten 30^{mm} weit.

2. König hat auch erprobte Rijke'sche Röhren vorräthig, mit welchen sich bequem experimentieren lässt.

b) Bosscha[56]), der bei Rijke's Versuchen zugegen war, bemerkte, dass zuweilen ein nur sehr kurze Zeit anhaltender Ton auftritt, sobald man das Netz zu erhitzen beginnt. Die Flamme muss bei diesem Versuche ein wenig entfernt vom Netze sein. Der Ton war etwas veränderlich, schien zu steigen; im Ganzen war er nahezu die höhere Octave des Grundtones. Diese Erscheinung bietet die Kehrseite zur vorigen und

auch die Ursachen sind hier die entgegengesetzten. Der heiße Luftstrom wird am Gitter abgekühlt und zieht sich zusammen. Riess[57]) hat diesen Versuch (1859) wiederholt und gefunden, dass man den Grundton mit Sicherheit und für längere Dauer (12 bis 70 Sec.) erhält, wenn das Netz im oberen Drittel angebracht und die Flamme von unten eingeführt wird. Der Versuch gelingt zwar auch mit einer Kerzenflamme; eine Gasflamme ist aber tauglicher, weil ihre Länge für das andauernde Tönen sich besser regulieren lässt.

Wenn man nach dem Aufhören des Tönens die Flamme entfernt und abwartet, ob jetzt das Tönen wie bei Rijke's Versuch eintritt — so hat man vergebens gehofft. Wol aber tritt sogleich das Tönen nach Rijke ein, wenn die Röhre umgekehrt wird.

Als das Netz kalt geworden und es in jener Lage erhitzt wurde, bei welcher das Netz nach unten lag — kam kein Ton zu Stande und bei Rijke, wie erwähnt, nur ein kurz dauernder Ton. Hieraus folgt, nach Riess, dass bei den in Rede stehenden Versuchen die Impulse in der längeren Luftsäule zu Stande kommen müssen; also bei Rijke's Erscheinung ober dem Drahtgitter, bei Bosscha's Ton unter demselben. Im ersten Falle stößt der ausgedehnte Luftstrom gegen die Luftsäule über dem Netz; im zweiten Falle trifft die, durch die kalten Maschen verdichtete Luft gegen die längere Luftsäule unterhalb des Geflechtes und versetzt sie in Schwingungen.

1. Das Netz war aus $^1/_{12}$‴ dickem Messingdraht, 40 Maschen auf 1□″ Pariser Maß. Die Netze wurden verschieden gestellt und der Ton erhalten. Die nachstehenden Maße bezüglich des Ortes der Netze beziehen sich auf die längste Dauer des entstehenden Tones.

2. Die Röhren von Riess hatten folgende Dimensionen in Pariser Mass und gaben die daneben angezeigten Töne:

	Länge	Weite	Lage des Netzes von oben	Bei kaltem Luftstrom (Rijke)	Bei heissem Luftstrom (Bosscha)
Nr. 1	17·4″	11·5‴	4·75″	f^1	fis^1
Nr. 2	12″	12‴	2·5″	c^2	cis^2
Nr. 3	10·7″	15‴	2·75″	d^2	d^2
Nr. 4	7·83′	12‴	2″	Null	g^2
Nr. 5	6″	1·5″	verschieden	Null	Null.

c) Der Bosscha'sche Ton müsste, wie Riess [58]) schloss, (1860), durch zweckmäßige Abkühlung des Drahtgeflechtes in seiner Dauer verlängert werden.

Er umgab daher jene Gürtel einer kupfernen Klangröhre, welche das Netz enthielt, mit einem kalten Wasserbade und erhitzte mit einer 2" hohen Gasflamme. Die Röhre tönte durch 10 Minuten sehr stark, jedoch unrein wechselnd von cis ^{2} bis d ^{2}. Um die Temperatur des Geflechtes noch mehr durch Ableitung zu erniedrigen, wurde eine etwas kleinere kreisförmige Scheibe aus Kupferblech über das etwas größere Drahtnetz gebracht. Bevor es noch zur Berührung beider kam, fing die Röhre zu tönen an, und zwar reiner und tiefer als früher. Die Scheibe, indem sie den heißen Luftstrom beschränkt, wirkte günstig auf die Anregung der Impulse unterhalb des Geflechtes.

Als die Kupferscheibe auf das Drahtnetz gedrückt wurde, so dass nur noch ein Drahtring blieb und als das Kältebad fleißig umgerührt wurde, dauerte der Ton länger als 1 $^1/_2$ Stunden und er würde wahrscheinlich noch länger gewährt haben, wenn der Versuch nicht freiwillig abgeschnitten worden wäre. Der Ton war in den ersten $^5/_4$ Stunden ein reines starkes c, später wurde er schwächer und etwas höher. Dieser Versuch gestattet selbstverständlich die mannigfaltigsten Modificationen und es wird daran gewiss nicht fehlen.

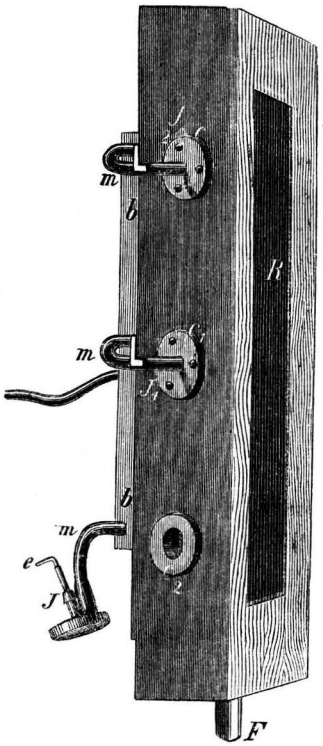
Die auf dem Drahte liegende Scheibe lässt z. B. durch eine leichte Kupfertasse mit Eis oder dgl. oder das Wasser durch Schnee ersetzen und das Resultat beobachten u. dgl. m.

An die gewöhnliche chemische Harmonica ist hier nicht zu denken; denn erstens ist die Flamme an einem Puncte, wo sie allein keine Töne bewirken kann. Dadurch unterscheidet sich der Bosscha'sche Ton überhaupt von der chemischen Harmonica und von der früher erwähnten Erfahrung von Martens, vermöge welcher ein ober der Flamme eingeführtes Drahtnetz sogar den Ton verstummen macht. Überdies aber hörte der Ton plötzlich auf, ohne wieder zu kommen, als das Kühlwasser abgelassen worden war.

Die kupferne Klangröhre war $12^1/_4$'' lang und $14^3/_4$''' weit. Das Netz stand vom obern Ende $2^1/_4$'' ab. Das kupferne Kühlgefäß, durch dessen Boden die Klangröhre concentrisch gieng, hatte eine Höhe von $5^3/_4$'' und eine Weite von $7^1/_2$''.

96. König's Röhre zum Nachweise der Knoten und Bäuche mittelst manometrisch bewegter Flammenzeiger. a) Die abwechselnde Verdichtung und Verdünnung der Luft an den Knotenflächen in einer tönenden Röhre und die natürliche Dichte der Luft in den Bäuchen suchte man bisher auf verschiedene Weise zu zeigen. Was zunächst die Aufsuchung der Knotenstellen in den Pfeifen betrifft, so führt man bekanntlich einen eng anschliessenden Pfropfen in die Röhre ein. Je nachdem letzterer an der 1., 2. oder 3. Knotenfläche vom Mundstücke sich befindet, hört man dann den Grundton, oder beziehungsweise den harmonischen Ton 3, 5..... — Hinsichtlich des Nachweises der Bäuche werden die betreffenden Stellen durch Schieber, Ventile oder Abschraube-Vorrichtungen geöffnet, ohne dass sich die Tonhöhe der Pfeife ändert. Um die Knoten und Bäuche gewissermaßen dem Auge vorzuführen, dient nach Hopkin die Bewegung oder Ruhe des Sandes auf einer in die Röhre eingesenkten Membrane. Allein letztere modificiert schon den Ton.

Fig. 85.



Um diesen rein zu erhalten und dennoch die Lage der Knoten und Bäuche recht augenfällig zu machen, könnte man auf die Idee kommen, an den betreffenden Stellen die gewöhnlichen manometerischen Vorrichtungen anzubringen. Diese

versagen jedoch wegen des sehr schnellen Wechsels im Dichtigkeitszustande den Dienst. König [59]) in Paris bedient sich zu dem vorgesetzten Ziele der Flammenzeiger. Er versieht (Fig. 85) die Seitenwand einer Pfeifenröhre von quadratischem Querschnitt an drei Stellen mit je einer Öffnung, und zwar da, wo beim Grundton oder bei der nächsten Octave Knotenflächen zu erwarten sind. Vor jeder dieser Öffnungen ist eine Kautschukmembrane gespannt und ein kleiner Gasbrenner angebracht. Sämmtliche Brenner erhalten aus einem gemeinschaftlichen Gascanal *bb* die Zufuhr des Leuchtgases. Zum Gascanal selbst geht ein Kautschukschlauch, welcher mit einer Leuchtgasquelle verbunden wird. Gesetzt man hätte an jedem der Brenner eine mittelgrosse Flamme erzeugt und man bläst die Pfeife schwach an, derart, dass sie den Grundton vernehmen lässt, so vibrieren alle drei Flammen, die mittlere jedoch am stärksten. Da nämlich letztere genau an der Knotenstelle liegt, so wird bei der hier erfolgenden Verdichtung der Luft die Membrane in die Kapsel am stärksten hineingedrückt, weshalb die Flamme in die Höhe zuckt. Bei der darauf erfolgenden Verdünnung muss das Entgegengesetzte erfolgen. Und daher das mächtigere Vibrieren! An den beiden anderen, zwischen den „Knoten“ und „Bäuchen“ liegenden Stellen ist der Wechsel im Zustande der Dichtigkeit bedeutend geringer. Und das Vibrieren mässiger!

b) Sind die drei Flammen bei diesem Versuche sehr klein, so erlischt sogar die mittlere Flamme, während die beiden Eckflammen schwach vibrieren.

c) Bläst man nun die Pfeife stärker an, so dass sie die höhere Octave gibt, so vibrieren die beiden andern Flammen auffallend und die mittlere Flamme bleibt ruhig. Diesmal sind also die beiden ersten Flammen genau an den Knotenflächen und die mittlere Flamme vor einem Bauche. Kleinere Flammen zeigen auch hier die Knotenflächen durch ihr Verlöschen an.

d) Eine der Seitenwände dieser Pfeife ist aus Glas, wodurch man in das Innere der Pfeife sehen kann, und die es möglich

macht, diese Pfeife auch zu dem oben erwähnten Hopkin'schen Versuch zu verwenden.

1. In Fig. 85 strömt bei dem hinter bb angebrachten Kautschukschlauch das Leuchtgas ein.

2. bb ist hohl und gestattet den Zutritt des Leuchtgases zu c, c_1 c_2.

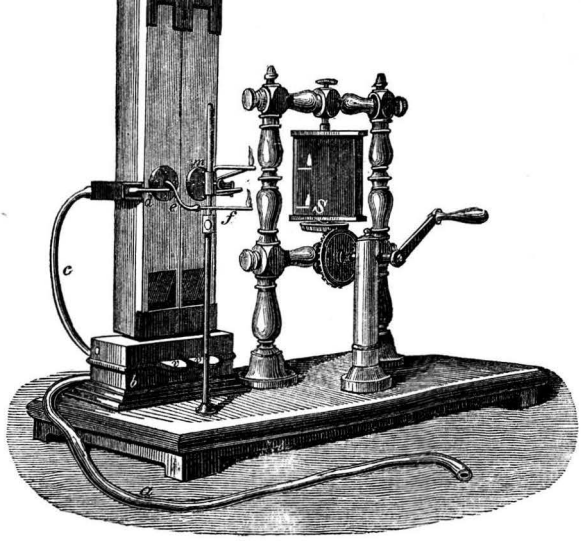
3. J zeigt uns den abgeschraubten Index, während er bei c_1 und c befestigt erscheint; bei J ist e der Brenner, m das Kautschukröhrchen zur Zuleitung des Gases aus b in den Brenner. Bei R kann man durch eine Glasplatte in das Innere der Pfeife sehen.

4. Die Kautschukmembranen verderben mit der Zeit, und müssen durch neue ersetzt werden, wenn der Versuch gelingen soll.

5. Auch eine gedackte Pfeife mit Flammenzeiger hat König eingerichtet. Der eine Index sitzt am geschlossenen Ende der Röhre, der zweite am Bauche und der dritte im zweiten Knoten des Tones 3, der hier der erste vernehmbare harmonische Ton ist.

97. Interferenz-Pfeifen mit Flammenzeigern. *a*) Dasselbe Princip hat König[60]) benützt, um das Phasen- und Tonverhältnis der Luftschwingungen in zwei Pfeifen vor das Auge zu bringen. Jede der beiden Pfeifen (Fig. 86) ist im Knotenpuncte ihres Grundtones mit

Fig. 86.



einer ähnlichen Flammenvorrichtung wie beim vorigen Apparat versehen. Die beiden Gasbrenner sind aber diesmal längs eines Stabes, einer über den anderen, verstellbar. Das Leuchtgas kommt in diese Brenner *f* mittelst kleiner Kautschukcanäle *e* aus den in der Pfeife mit Membranen geschlossenen Kapseln *m*. Sind die beiden Pfeifen auf den genauen Einklang gestimmt (beide c^1) und bläst man sie gemeinschaftlich aus einer kleinen Windlade *b* an; so hört man den Ton schwächer, als wenn eine der Pfeifen allein angesprochen wird. Es entsteht nämlich bei einem gemeinschaftlichen Anblasen gleich gestimmter Pfeifen in dem Knotenpuncte der einen Pfeife eine Verdünnung, wenn bei der anderen im gleichliegenden Knoten eine Verdichtung sich bildet. Die von den beiden Knotenpuncten in die Luft übertretenden Wellen treffen dann mit entgegengesetzten Phasen auf einander („interferieren") und schwächen den Ton (§. 27). Hat man nun die beiden Flammen untereinander gestellt, und dreht den vor ihnen aufgestellten Spiegel rasch um die aus der Figur ersichtliche Axe, so werden dadurch die Bilder der vibrierenden Flammen in ihre einzelnen Elemente aufgelöst. Man sieht dann untereinander zwei Reihen von Flammenbildern, von welchen je zwei Bilder bezüglich derselben Lothrechten stark verschoben erscheinen, so dass fast stets ein oberes Bild mit einem unteren Bilde wechselt und sie nahezu zwischen einander fallen. Daraus folgt, dass die zu den aufzuckenden Flammen (Flammenbildern im Spiegel) nothwendigen Verdichtungen nicht gleichzeitig auftreten, sondern in der einen Pfeife früher als in der andern.

Fig. 87.

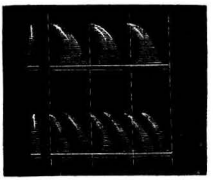


b) Hat man die beiden Pfeifen so gestimmt (c^1 u. $\pm c^1$), dass sie „Stöße" geben, so liegen die einzelnen Flammenbilder beider Bilderreihen bald auf derselben Lothrechten im Spiegel, bald wieder nicht, d. h. das Aufzucken beider Flammen kommt bald gleichzeitig, bald nicht. Die Verdichtungen an den „Knoten" beider Pfeifen erfolgen demnach bald gleich-

zeitig, bald nicht. Und ebenso ist es mit den Verdünnungen an dieser Stelle.

c) Ersetzt man die eine der Pfeifen durch eine zweite, welche um eine Octave höher oder tiefer gestimmt ist (Pfeifen mit c^1 und c^2), so sieht man (Fig. 88), dass je zwei zu der einen Pfeife (c^2) gehörige Flammenbilder je einem Flammenbilde der zweiten, zur tieferen Pfeife (c^1) gehörigen Reihe entsprechen.

Fig. 88.



Für das Tonverhältnis c^1 und g^1 kommen je zwei Flammenbilder der tieferen Pfeife auf drei der höher gestimmten.

In solcher Weise entspricht je einem anderen Phasen- oder Tonverhältnis beider Pfeifen eine andere Combination der Anzahl und Lage der Flammenbilder der einen Reihe gegen die andere. Durch längere Übung kann man auch hier, in ähnlicher Weise wie bei den Stimmgabeln von Lissajous, das Verhältnis der Tonhöhe und Phasen der Schwingungen von Luftsäulen mit dem Auge erkennen.

Fig 89.

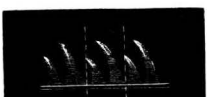
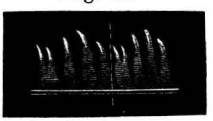


Fig. 90.



d) Man kann auch das Gas zweier Kapseln in einen gemeinschaftlichen Brenner leiten, und erhält dann (Fig. 89) für das Tonverhältnis 1 : 2 je ein großes Flammenbild, welchem ein kleines folgt. Bei complicierten Tonverhältnissen z. B. 4 : 5, verdient dieses Verfahren sogar vor jenem mit getrennten Brennern den Vorzug. Man erhält nämlich (Fig. 90) im ersten Fall ein großes Flammenbild zwischen zwei etwas kleineren und zwei ausgesprochen kleineren, also im ganzen fünf Flammenbilder und darunter vier kleinere (4 : 5), was das Auge leichter fasst, als das Verhältnis von 4 zu 5 getrennten, unter einander liegenden Flammenbildern.

I. König gibt diesem Apparat fünf Pfeifen bei, nämlich zwei gestimmt. auf c^1, welche sich behufs der Stöße bis zu einem halben Tone verstimmen lassen; dann drei mit den Tönen e^1, g^1 und c^2.

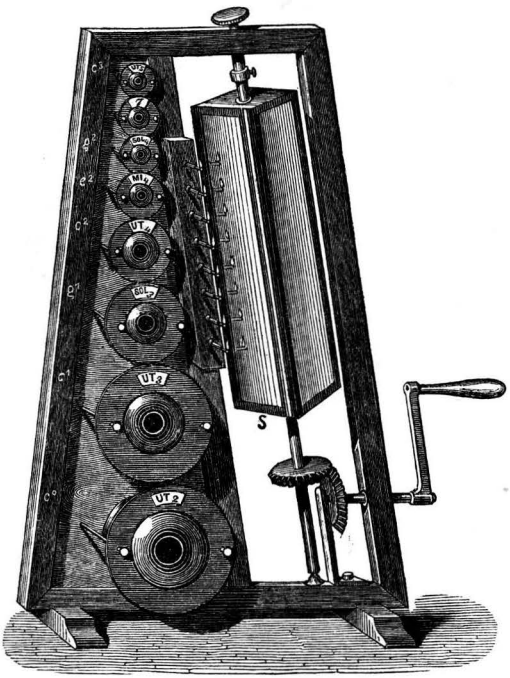
2. Der Kautschukschlauch a (Fig. 86) führt den Wind in die kleine Windlade b. Durch eine ähnliche Kautschukröhre wird das Leuchtgas in einen im oberen Theile der Windlade b befindlichen Canal geleitet, aus dem es durch die Kautschukröhren c und d in die Kapsel m und von da in die Brenner strömt. Die Schieber g und g^1 dienen zum Öffnen der zu den Pfeifen führenden Mündungen des Windkastens b. — Das Untereinanderstellen der Flammen geschieht durch Herumdrehen des Stieles, welcher den Brenner trägt.

3. Sind die beiden gleichgestimmten Pfeifen gedeckt, so haben sie Töne, welche den ungeraden Zahlen entsprechen, und ein entferntes Ohr hört, wenn die Pfeifen gleichzeitig aus demselben Luftbehälter angeblasen werden, nur ein Sausen und zwar vermöge der Interferenz der Wellen, welche hier um eine halbe Welle verschieden sind und wo je eine Verdichtung mit einer Verdünnung der Luft zusammenfallen und sich nahezu aufheben. (Vergl. §. 27.)

4. Bei offenen Pfeifen und Zungenpfeifen, welche unter den hier besprochenen Umständen angeblasen werden, verlöschen zwar die Grundtöne und ungeradzahligen Partialtöne, weil sie sich um eine ungerade Anzahl halber Schwingungsdauern unterscheiden, ebenfalls; aber die geradzahligen harmonischen Töne, indem ihr Phasenunterschied eine gerade Anzahl halber Wellenlängen ausmacht, sind hörbar und zwar die erste höhere Octave am stärksten, so dass der Klang der beiden gleichgestimmten und gleichzeitig aus einem gemeinschaftlichen Gebläse angesprochenen Pfeifen im Ganzen zwar schwächer als jener einer einzigen der beiden Pfeifen erscheint, dass aber dennoch die nächst höhere Octave vorzugsweise hörbar ist. (Vergl. §. 27.)

98. König's Resonatoren-Flammen-Apparat zur Analyse des Klanges. *a*) Statt der objectiven, mit einer Membrane geschlossenen Resonatoren (§. 7) wendet König[61]) in jüngster Zeit Resonatoren an, welche ihre Erregung durch den Klang mittelst einer kleinen Gasflamme (§. 96) kund geben. Auf einem lothrecht gestellten, aus Holz gefertigten Trapez (Fig. 91) sind acht verschieden gestimmte Resonatoren übereinander so befestigt, dass die größeren, also tieferen, unten liegen. Die kleinere Öffnung eines jeden der Resonatoren mündet in ein Kautschuckrohr, welches am anderen Ende in je eine manometrische, mit einem Brenner für eine kleine Flamme versehene Kapsel (§. 96) luftdicht reicht. Die jener Resonatorreihe in solcher

Fig. 91.



Weise entsprechenden acht kleinen Flammen liegen also in einer Geraden, und zwar in einer möglichst kurzen, über einander an der Seite des Resonatorenträgers. Parallel dieser Flammenreihe ist ein Spiegel *S* aufgestellt. Wird letzterer rasch um seine Axe gedreht, so lösen sich die Bilder jener Flammen, welche einem erregten Resonator angehören, in ihre Elemente auf (§. 90), während die mit den ruhig gebliebenen Resonatoren in Beziehung stehenden Flammen sich beständig (constant, nicht intermittierend) zeigen (§. 97).

1. Es versteht sich von selbst, dass man in ähnlicher Weise eine Reihe objectiver Membranen-Resonatoren mit leichten Pendelchen (§. 7) herrichten könnte. Bei den erregten Resonatoren kämen die Pendelchen in Bewegung. Die übrigen blieben in Ruhe.

2. Die von König zu diesem Apparat verwendeten Resonatoren sind: ut_2 (c^0), ut_3 (c^1), sol_3 (g^1), ut_4 (c^2), mi_4 (e^2), sol_4 (g^2), (1792 einfache Schwingungen), ut_5 (c^3).

b) König hat den vorigen Apparat auch dahin abgeändert, dass vor einem kleinen ebenen Drehspiegel eine Flamme liegt, welche nach dem uns schon bekannten Princip als manometrischer Zeiger dient (§. 96). Die zu dieser Flamme gehörige Kapsel endet in einen Kautschukschlauch, der successive mit der kleineren Mündung verschiedener Resonatoren verbunden werden kann. Man sieht, dass dieser Apparat, wie der so eben beschriebene (*a* dieses §.) gebraucht werden wird; aber er ist minder bequem, weil man zum Tantonnieren gezwungen ist; dafür kostet dieses Instrument aber auch beträchtlich weniger ($^1/_8$ vom Preise des vorigen Apparates).

IX.

Apparate bezüglich der Fortpflanzung des Schalles.

A. Ermittelung der Schallgeschwindigkeit auf kleineren Strecken.

99. Princip der Methode, die Schallgeschwindigkeit bei kleineren Standlinien zu bestimmen. a) Die Geschwindigkeit der Verbreitung des Schalles in der Luft wurde bekanntlich bisher so gemessen, dass für eine weitere Strecke s an der einen Station ein starkes Schall- und Lichtsignal durch Abfeuern einer Kanone gleichzeitig gegeben [1]), und an der zweiten, entfernten Station der Zeitunterschied t zwischen der augenblicklichen Wahrnehmung des Lichtes und des späteren Hörens des Schalles angemerkt wurde. Man hatte dann nur die Länge des Weges durch die beobachtete Secundenanzahl zu dividiren und die Schallgeschwindigkeit zu berechnen (nach der Formel $c = \frac{s}{t}$). Diese Methode verursacht jedenfalls durch das nothwendige Hereinziehen der Artillerie zu viele Umstände; sie ist zum Variiren der Versuche zu schwerfällig und der Kanonendonner zu gedehnt, um eine große Genauigkeit zu gestatten. Jedenfalls war eine Versuchsweise erwünscht, die es gestattet, in einem größeren Saale, in einem Garten u. dgl. m. die Schallgeschwindigkeit zu messen.

Zu diesem Behufe musste aber nach einem Mittel gesucht werden, vermöge dessen die Zeit, welche der Schall zu seiner freien Weiterleitung braucht, in bequemen Bruchtheilen einer Secunde genau angegeben ist; denn dann konnte man den Weg des Schalles für diese Zeit in demselben Verhältnisse kleiner nehmen. Dieses Princip der Messung der Schallgeschwindigkeit ist nun nach dem ersten Vorschlage von J. Bosscha [2]), von R. König [3]) in Paris verwirklicht. Das „Wie“ soll im folgenden klar werden.

Wird in der Formel $c = \frac{s}{t}$ die Zeit t n mal kleiner, so wird auch die Versuchsstrecke (die Basis) s n mal kleiner. So ist z. B. bei 0·1 oder 0.01 Zeitsecunden auch der Weg des Schalles beziehungsweise nur 0·1 oder 0·01 der früheren Länge.

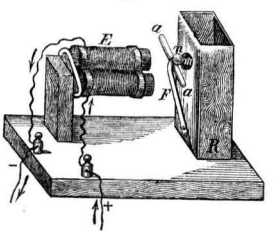
b) Nach den von französischen Akademikern angestellten Versuchen ist die Geschwindigkeit des Schalles in der freien Luft, bei + 6° C. 337.18 Meter. Ihre Größe ist übrigens veränderlich nnd hängt von den Wärme-, Feuchtigkeits-, Luftdruck- und Windverhältnissen ab. Gesetzt, die Geschwindigkeit des Schalles wäre nach den eben herrschenden Umständen 338 Meter, d. h. der Schall lege in einer Secunde eine Strecke von 338 Meter zurück, dann ist die Strecke, welche er in 0·1 Secunde durchmacht, gleich 33·8 Meter. Steht nun eine solche Strecke zu Gebot und hätte man zwei mechanische Vorrichtungen, welche genau nach 0·1 Secunde einen kurzen, kräftigen Schlag geben, so wäre das gesuchte Mittel, die Schallgeschwindigkeit bei kürzeren Strecken (etwa 34^{m}) zu messen, gefunden. Denn so lange beide Schlagwerke hart neben einander stünden, würde man ihr gleichzeitig erfolgendes, kräftiges Ticken auch zusammenfallend (coïncidierend) hören. Bliebe man aber äußerst nahe dem einen Schlagwerk A und ließe das andere B entfernen, so würde der von letzterem ausgehende Schall eine gewisse, wenn auch kurze Zeit brauchen, um zu dem Ohre des Beobachters zu gelangen, er würde also etwas später gehört werden. Wäre endlich das zweite Schlagwerk 33.8 Meter von dem ersten Schlagwerke und von dem bei letzteren befindlichen Gehör des Beobachters gebracht worden, so fiele der zweite Schlag des entfernten Werkes B mit dem ersten Schlage des Werkes A für den dicht bei letzterem stehenden Beobachter zusammen.

c) Aus dem Vorigen ergibt sich: Zur Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles bei kleineren Standlinien hat man nach mechanischen Vorrichtungen zu suchen, welche in bequemen Bruchtheilen von Secunden gleichzeitig trockene, kräftige Schläge geben. Der Beobachter hat dann sehr nahe bei dem einen Schlagwerk A zu bleiben, während

das andere Schlagwerk *B* so lange von dem Beobachter entfernt wird, bis die genaueste Coïncidenz der Schläge für sein Ohr eintritt. Ist dann z. B. 33.8^m der Abstand beider Schlagwerke und 0·1 Zeitsecunde das Intervall, nach welchem die Schläge der Zählwerke aufeinander folgen, also die Zeit, welche der Schlag gebraucht hat, um die Strecke $33·8^m$ von dem zweiten Schlagwerke bis zum Beobachter zurückzulegen, so hat man dann nach der Berechnungsweise der gleichförmigen Geschwindigkeiten ($c = \frac{s}{t}$) .... $33·8^m : 0·1'' = 338$ Meter für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles.

100. R. König's Apparat, um die Geschwindigkeit des Schalles für kürzere Standlinien zu messen. a) Die im Vorigen aufgestellten Forderungen bezüglich der Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten bei kurzen Strecken hat R. König in Paris wie folgt verwirklicht: Man denke sich (Fig. 6, pg. 22) eine Stimmgabel *G*, welche in einer Secunde genau 10 doppelte Schwingungen macht und welche folglich in jener Weise, wie dies im §. 11 auseinandergesetzt wurde, nach dem Principe der Neef'schen Selbstunterbrechung einen galvanischen Strom nach je 0.1 Secunde immer wieder herstellt. Hat man nun in die Leitung des galvanischen Stromes zwei elektromagnetische Schlagwerke eingeschaltet, wovon eines in Fig. 92 abgebildet erscheint, so werden diese gleichzeitig ihre hörbaren Zeichen geben und zwar ebenfalls nach je 0·1 Secunde, weil sie von der stromherstellenden Stimmgabel abhängig sind. Sobald nämlich die letztere (Fig. 6) mit ihrem stählernen Stifte *c* in das Quecksilber des Säulchens *N* taucht, wird die galvanische Kette geschlossen und folglich (Fig. 92) die Elektromagnete thätig. Diese ziehen den Anker *a a* aus weichem Eisen an. Da aber der galvanische Strom, wegen des Zurückschwingens des Stiftes *c* (Fig. 6), augenblicklich wieder aufhört, so wird auch (Fig. 92) der Anker sogleich wieder mittelst der Feder *F* von den Elektromag-

Fig. 92.



neten entfernt. Dabei ist die Feder derart gespannt, dass das Zurückführen des Ankers mit großer Kraft geschieht, so dass ein an dem Anker vorne befindlicher Metallknopf n einen kurzen, kräftigen Schlag gegen ein Metallplättchen m gibt, welches in der vorderen Wand eines Resonanzkästchens R befestigt ist. So oft also die galvanische Kette geöffnet wird, hört man von den beiden galvanisch regulierten Zählwerken einen trockenen, kurzen und kräftigen Schlag, und dies, bei der hier gewählten Gabel, 10mal in der Secunde.

b) Man sieht leicht, dass die im vorigen §. aufgesuchten Bedingungen hier erfüllt sind. Gleichzeitig schlagende Werke, welche (unter Beibehaltung passender Leitungsdrähte) von einander so lange entfernt werden können, bis ihre Schläge einem bei dem einen Zählwerke befindlichen Ohre vollkommen gleichzeitig erscheinen. Wäre 338^{m} die Schallgeschwindigkeit, so wird dieses Coïncidieren der Schläge stets nur bei einem Abstande von 33·8 oder einem Vielfachen von 33·8 statt haben, während ein genug auffallendes Nichtzusammenfallen der Schläge bei jedem anderen Abstande der beiden Zählwerke sich kund geben wird.

c) König zeigt selbst an, dass der eben besprochene Apparat noch nicht vollkommen sei; er besitze aber bereits die wesentlichsten Eigenschaften, um die Schallgeschwindigkeit für eine kürzere Standlinie (Basis) bestimmen zu können. Eine genaue Messung der Schallgeschwindigkeit scheint jedoch mittelst dieses Apparates noch nicht vorgenommen worden zu sein. Es ist aber gewiss eine bedeutende Errungenschaft für die Akustik, das Princip der Schall-Coïncidenzen für die Messung der Schallgeschwindigkeit verwerthet zu sehen. Das Ohr ist nämlich in dieser Beziehung äußerst empfindlich und dadurch eine große Genauigkeit für die Messung der Schallgeschwindigkeit im voraus gewährleistet. Das Auge kann z. B. zwei Lichtblitze, welche um 0·05 Zeitsecunden auseinander liegen, nicht mehr getrennt wahrnehmen. Die Lichtempfindungen fließen wegen der taumatropischen Nachwirkung auf der Netzhaut (§. 90) in eine einzige zusammen. Das Ohr hingegen unterscheidet noch deutlich

von zwei neben einander hängenden Pendeln die Schläge und Ticke, wenn diese auch nur um 0·01 Zeitsecunden auf einander folgen. Dieser Umstand wurde schon früher von den Astronomen der Neuzeit[4]) zur Bestimmung kleiner Zeitunterschiede und jetzt für die Messung der Schallgeschwindigkeit benützt. Als die König'schen elektro-magnetischen Schlagwerke 3·5^m von einander entfernt waren, unterschieden die dicht bei dem einen Schlagwerke *A* stehenden Beobachter noch sehr deutlich das Auseinanderliegen der trockenen Schläge, obschon die vom Schlagwerke *A* herrührenden Schläge gegen die vom Schlagwerke B kommenden, stets nur einen Vorsprung von nahezu 0.01 Zeitsecunde hatten. Dieser Umstand zeigt zur Genüge, dass die 10 Schläge, in der Secunde, welche von der Unterbrechungsgabel reguliert werden, der Schärfe und Genauigkeit keinen Eintrag thun, und dass man also keine langsamer schwingende Gabel, mithin keine grössere Standlinie, als etwa 34^m brauche. Neben der Genauigkeit und Bequemlichkeit, den ein solcher Apparat dem Experimentator bietet, wird er auch gestatten, die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen oder Flüssigkeiten zu messen. Die betreffenden Modificationen des Versuches ergeben sich dem Denkenden leicht von selbst.

Die unterbrechende Gabel *G* (Fig. 6) wird durch passendes Verschieben der Laufgewichte nach der optischen Methode von Lissajous so gestimmt, dass sie genau zehn doppelte Schwingungen in der Secunde gibt. Es verhält sich bezüglich dieser Stimmung wie folgt: Die unterbrechende Gabel ist mit einem kleinen Spiegel versehen, welcher das Bild des glänzenden Punctes einer Stahlkugel auf eine rechtwinkelig combinierte, fernstehende tönende Stimmgabel mit 40 Doppelschwingungen wirft, wodurch die entsprechende Lissajous'sche Lichtfigur entsteht (§. 56). Wenn diese Figur nicht ruht, so hat der galvanische Strom und mithin der Elektromagnet seine Stärke und die unterbrechende Gabel ihre Schwingungszahl geändert — jetzt muss man mittelst des Laufgewichtes der unterbrechenden Gabel die Ruhe der Lichtfigur wieder herstellen.

101. Geschichtliches bezüglich der Schall-Coïncidenzen in ihrer Anwendung zur Messung der Schallgeschwindigkeiten. a) Die erste Idee, die Schall-Coïncidenzen zur Messung der Schallgeschwindigkeit zu verwenden, stammt unstreitig von J. Bosscha[5])

Schon im Jahre 1853 spricht er sich in dieser Beziehung wie folgt aus:

„Wenn man über einen Raum von 330 Ellen verfügen kann, wird man mittelst einer einzigen Uhr die Geschwindigkeit des Schalles bestimmen können. Man verbindet nämlich eine Uhr mit einem galvanischen Apparate, schaltet aber in die Kette zwei elektromagnetische Glocken ein, die so eingerichtet sind, dass, wenn sie dicht neben einander gestellt sind, die Schläge genau zusammenfallen. Wenn man sich mit einer der Glocken entfernt, so werden die Schläge scheinbar auseinander gehen, bis man zu einem Abstand gekommen sein wird, der genau demjenigen gleich ist, welchen der Schall in der Zwischenzeit zweier aufeinander folgender Ticke der Uhr durchläuft. Entfernt man sich noch weiter, so gehen die Ticke wieder auseinander, bis man zu dem doppelten Abstande gekommen ist, wo sie wieder zusammenfallen, und sofort."

König bleibt nach dem eben Vorgetragenen allerdings das Verdienst, die Standlinie auf ein Zehntel von der Bosscha-schen herabgebracht und überhaupt den Versuch aus dem Reich der Ideen in jenes der Thatsachen versetzt zu haben.

Dr. Kahl[6]), dasselbe Princip in's Auge fassend, schlägt vor, sich mit einem secundenschlagenden Chronometer von einer echogebenden Wand so lange zu entfernen, bis die directe und zurückgeworfene Ticke genau zusammenfallen. Der doppelte Abstand des gebrauchten Zeitmessers von der schallreflectierenden Wand ist dann gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles.

b) Dr. J. Bosscha[7]) hat eigentlich das vorhin besprochene Verfahren nur angedeutet; er selbst versuchte die Methode der Coïncidenzen in einer anderen Weise, welche durch folgende Betrachtung klar werden soll: Gesetzt, das Pendel einer Uhr *B* mache 99 Schläge, während jenes einer zweiten dicht daneben befindlichen Uhr *A* 100 Schläge gibt, und zwar in jeder Secunde einen Tick; so ist klar, wenn beide Pendel ihre Schläge gleichzeitig beginnen, dass je der 100ste Tick von *A* mit dem 99sten von *B* zusammenfallen wird (vergl. §. 19). Der zweite Schlag des Pendels *A* wird um 0·01 Zeitsecunde früher erfolgen, als der 2. des Pendels *B*. Will man jedoch auch diese Schläge gleich-

zeitig hören, so muss man das Pendel *A* um 3·38 Meter von dem dicht beim Pendel *B* verharrenden Beobachter entfernen, vorausgesetzt, die Geschwindigkeit des Schalles sei 338 Meter in der Secunde.

Während der Beobachter beim Pendel *B* bleibt, muss das Pendel *A* um $2 \times 3{\cdot}38^{m}$, 3×3.38^{m} .... $10 \times 3{\cdot}38$ Meter von dem Ohre entfernt werden, wenn die beiden Ticke auch nach der 2., 3., 10. Secunde zusammenfallend gehört werden sollen; denn der um 0·02, 0·03 ... 0·1 Secunden früher erfolgende Tick des Pendels *A* braucht gerade diese Zeit, um vom Orte *A* zum Ohre des beim langsamer schwingenden Pendels *B* stehenden Beobachters zu gelangen.

Und jetzt umgekehrt! Die beiden Pendel seien 33.8^{m} voneinander entfernt und man will durch zweckmäßige Annäherung beider Pendel stets Coïncidenzen ihrer Schläge hören, was ist da zu thun? Wenn der beim schnelleren Pendel A befindliche Beobachter soeben eine Coïncidenz der Ticke beider Pendel vernommen hat, und er will die nächsten Ticke nach einer Secunde wieder zusammenfallend vernehmen, so muss man ihm das langsamere Pendel *B* um $3{\cdot}38^{m}$ nähern. Dieses letztere Pendel ist jetzt um 0·01 Secunden zurückgeblieben, und dies soll durch die größere Nähe zum Ohre ausgeglichen werden, indem dann der Schall bei einer um 3·38 kleineren Entfernung gerade um 0·01 Secunde früher beim Ohre anlangt.

Aus dem Gesagten ist klar, dass bezüglich des subjectiven Zusammenfallens der Ticke, d. h. der Coïncidenzen hinsichtlich des Beobachters eine zweckmäßige Annäherung des langsameren oder Entfernung des schnelleren Pendels vom Beobachter in gleicher Weise zum Ziele führen.

Statt nun die Pendel zu übertragen, ist es wohl besser und einfacher, wenn der Beobachter sich zwischen beiden Pendeln so hin- und herbewegt, dass er stets nach einer bestimmten Zeit Coïncindenzen erhält, und zwar indem er entweder bei *A* oder *B* steht. Der Zeitunterschied der Coïncidenzen bei den verschiedenen Standpuncten des Beobachters hängt ab von dem

gegenseitigen Schnelligkeitsverhältnisse der Pendel, von dem Abstande der letzteren und von der Schallgeschwindigkeit.

1. Bosscha leitet die Formel für die Schallgeschwindigkeit nach dieser, von ihm ersonnenen Methode, wie folgt, ab: „Der Beobachter stellt sich z. B. neben A und bestimmt den beziehlichen Gang von A und B durch Aufzeichnung der Zeit, die zwischen den Augenblicken des Hörens der folgweisen Coïncidenzen verstreicht. Diese Zeit sei a'' (im vorigen Fall $= 100''$). Hat man den Zeitpunct aufgezeichnet, da man das letzte Mal neben A das gleichzeitige Schlagen vernommen hat, so begibt man sich nach B und wartet den Augenblick ab, da man wieder das Ticken zusammenfallen hört. Der Zeitraum zwischen diesen beiden Augenblicken wird grösser als a'' sein, z. B. $= a + n$. Begibt man sich nun wieder nach A, so wird der wahrgenommene Zeitraum kleiner als a sein und bei einer selben Ortsveränderung d gleich $a - n$. Die Geschwindigkeit v des Schalles ist dann $= \frac{2d}{\frac{n}{a}} = \frac{2da}{n}$ oder wenn b die Anzahl der Schläge zwischen den Beobachtungen bei dem ersten Gange von A nach B und b' die bei dem zweiten Gange von B nach A bezeichnet, $v = 2d\left(\frac{b + b'}{b - b'}\right)$.

Als Beispiel diene die folgende Bestimmung, angestellt in einem der Zimmer der Sternwarte zu Leyden mit zwei alten Secundenuhren von Knebel bei einem Abstand von 15 Ellen $a = 57''$; $a - n = 52$; $a = 57$; $a + n = 61{\cdot}5$; $a - n = 52$; $a = 57$; $a + n = 62$. Hieraus folgt $n = 4{\cdot}85''$; $a = 57$ und mithin $v = \frac{30 \times 57''}{4{\cdot}85''} = 352{\cdot}5$ Ellen“.

2. Professor Röber[8]) hat für diese Methode eine genauere Formel und Dr. Kahl[9]) eine andere Ableitungsweise derselben gefunden.

3. Bosscha macht auch Vorschläge, die Coïncidenz-Methode zur Bestimmung der Geschwindigkeit des galvanischen Stromes und der Gesetze des Inductionsstromes anzuwenden.

4. Faye[10]) hat später als Bosscha ganz die nämlichen Coïncidenz-Methoden wie der Letztere zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit vorgeschlagen. Die Priorität dieses schönen Gedankens gehört also ohne Zweifel dem Dr. J. Bosscha.

B. Die Brechung der Schallstrahlen.

102. Über die Brechung des Schalles. Die Analogie zwischen den Erscheinungen des Schalles und des Lichtes ließen längst voraussehen, dass es Mittel geben müsse, die Brechung des Schalles durch den Versuch nachzuweisen. Chr. Doppler[1]) schlug hiezu einen Apparat vor, welcher dazu dienen

sollte, die totale Reflexion des Schalles und so dessen Brechung indirect nachzuweisen. Er erklärte mittelst der totalen Reflexion des Schalles eine Erscheinung, welche sich bei der Ermittlung der Schallgeschwindigkeit im Wasser des Genfer-Sees von Colladon und Sturm (1824) ereignete, nämlich, dass von einer gewissen Strecke an, der im Wasser erregte Schall in der Luft nicht mehr gehört wurde, wol aber im Wasser. Von dieser Stelle an wurden also alle an die innere Seite der Wasseroberfläche gelangenden Schallstrahlen vermöge der totalen Reflexion nach innen zurückgeworfen und zwar ganz so, wie es die aus dem optischen Brechungsgesetze abgeleitete Formel verlangte; C. Sondhaus[2]) zeigte (1852) das Dasein der Schallbrechung mittelst grosser aus Collodiumhäutchen gebildeter Linsen, welche mit kohlensaurem Gas gefüllt worden war, und die einen Focus für die zusammentreffenden Schallstrahlen deutlich erkennen ließen, und endlich experimentierte (1856) C. Hajech[3]) mit einem für den Schall eingerichteten Prisma und leitete auf dem directesten Wege die Brechungsgesetze für den Schall ab, welche, wie zu erwarten war, der Hauptsache nach mit den optischen Brechungsgesetzen übereinstimmen.

103. Näheres über die Schall-Linse von C. Sondhaus. *a*) Die für die Schallstrahlen bestimmte Linse (§. 102) wurde mit Hilfe des Apothekers Herrn Müller in Breslau aus Collodiumhäutchen angefertigt. Die letzteren waren als Segmente einem großen Collodium-Ballon entnommen und zu beiden Seiten eines schmalen Blechreifens befestigt worden. Der Reif enthielt zwei mit Hähnen versehene Röhren, durch welche man die Kohlensäure in die Linsenhüllen so lange füllen konnte, bis dieselben straff und als Linse gewölbt erschienen — man hatte sodann im wesentlichen eine Linse aus Kohlensäure.

1. Der Durchmesser des Blechreifens war $11^1/_3$ par. Zoll und dessen Breite $2^1/_4$ par. Zoll.

2. Die Höhe der mit Kohlensäure aufgeblasenen Kugelsegmente betrug 2″, 5‴ und 2·5‴ par. Maß.

3. Die Schall-Linse bekam ein Stativ, wie es für die optischen Linsen als zweckmäßig üblich ist.

b) Als Sondhaus eine Uhr in die Axe dieser Schall-Linse brachte, hörte er auf der anderen Seite der Linse in einem bestimmten, auf der Linsenaxe gelegenen Puncte ihr Ticken am stärksten; nach diesem Puncte hin waren also die meisten der Schallstrahlen gebrochen worden. Befanden sich die Uhr oder das Ohr außerhalb der Linsen-Axe, so konnte das Ticken der Uhr jenseits der Linse nur sehr schwach oder gar nicht vernommen werden. Je weiter die Schallquelle auf der Linsenaxe von der Linse entfernt wurde, desto näher rückte der jenseitige Punct der größten Schallstärke an die Schall-Linse ganz so wie es die Linsengesetze erforderten. Aus der für die biconvexe Linse bekannten Formel berechnete Sondhaus sodann den Brechungsexponenten des Schalles der Kohlensäure.

Als Sondhaus eine tönende Orgelpfeife als Schallquelle vor der Schall-Linse verwendete, konnte er jenseits der Linse im Brennpuncte eine zarte Membrane in's Vibrieren und folglich feinen Sand, der auf die Membrane gestreut worden war, in Bewegung kommen sehen.

Das Flüstern auf der einen Seite der Linse konnte jenseits im Maximumpuncte des Schalles wol gehört, aber die Worte nicht deutlich unterschieden werden.

1. Als der Abstand der auf der Linsen-Axe befindlichen Uhr von der Linse 4 — 5 Fuß betrug, lag der Durchschneidungspunct der meisten Schallstrahlen $1^1/_4$ Fuß jenseits der Linse auf der Axe; für parallele Schallstrahlen war der Focus etwas über 1 Fuß von der Schall-Linse ab.

2. Behufs der auf den Membranen hervorzurufenden Sandbewegung wurden die Schallstrahlen von einem blechernen Trichter aufgefangen, dessen Axe mit jener der Linse zusammenfiel und der dann unter rechtem Winkel ein Rohr besaß, welches oben mit der feinen Membrane geschlossen war. Wenn demnach die Axen wagrecht lagen, so war das mit der Membrane oben geschlossene Winkelrohr lothrecht gerichtet.

3. Ursprünglich war der Versuch an einem Luftballon aus Goldschlägerhäutchen gemacht worden. Man hatte bei einem solchen, wenn er vom Wasserstoff- oder Leuchtgase aufgeblähet war, den auf der einen Seite errregten Schall auf der anderen Seite in der Axe deutlicher vernommen als außerhalb der Axe.

104. Das Schallprisma von Hajech. *a*) Nach den Gesetzen der Wellenlehre müssten Schallstrahlen, wenn sie schief

in ein anderes Mittel treten, so gebrochen werden, dass der Quotient aus dem Sinus des Einfallswinkels dividiert durch den Sinus des Brechungswinkels stets eine constante Größe geben würde, welche gleich dem Verhältnis der Fortpflanzungs-Geschwindigkeiten in den betreffenden Schallmitteln ist. Wenn aus dem neuen Schallmittel ein Prisma geformt wäre, so möchten daran im wesentlichen für die Brechung der Schallstrahlen die nämlichen Gesetze wie für die Lichtstrahlen an einem Glasprisma hervortreten. Hajech hat in neuerer Zeit (§. 102) mittelst eines solchen Schallprismas die Brechungsgesetze für den Schall durch sorgsame Versuche nachgewiesen. Er wendete eine cylindrische, metallische Röhre von großer, aber veränderlicher Länge an, welche durch die Wand zweier Säle ging. Die Röhre wurde an beiden Enden mit Membranen verschlossen und in eine zweite Röhre geschoben, welche am anderen Ende eine Büchse mit einem tönenden Instrumente (einem Schlagwerke mit Glocken von verschiedenen Tonhöhen, eine tickende Uhr) enthielt. Die Axen dieser beiden Röhren fielen stets in einander. So lange die Röhre mit atmosphärischer Luft gefüllt war, hörte man (wie es die Theorie der Wellenlehre fordert) immer in der Richtung der Axe am stärksten, die Membranen mochten gegen einander beliebig geneigt sein. Dasselbe war der Fall, wenn zwar die Röhre mit einem anderen Gas, aber mit Membranen an beiden Enden geschlossen wurde, die senkrecht zur Axe gerichtet waren. Sobald aber im letzteren Falle die Membranen schief gegen die Axe lagen, war der Ort des stärksten Schalles (des Schallmaximums) außer der Axe. Die Schallstrahlen hatten sich gebrochen.

Im letzteren Falle hatte man nämlich ein Prisma aus einem von der atmosphärischen Luft verschiedenen Schallmittel, welches von den Strahlen des Schalles durchlaufen wurde, ehe diese in die atmosphärische Luft übertreten konnten. Bei diesem Übergange verließen sie ihre gerade Richtung und wurden „gebrochen“. Zur Bestimmung des Brechungsgesetzes für den Schall waren auf jener Seite des Schallprismas, auf

welcher der Schall in die Luft übertrat, auf dem Boden graduierte Kreisbögen gezogen, die ihren gemeinsamen Mittelpunct in der lothrechten Projection von der verlängerten Axe des Gasrohres (Prismas) hatten. War die Lage der größten Schallstärke gefunden, so bestimmte man die Richtung des Schallstrahles mit Hilfe eines Senkels, das man vom Ohr auf den Fußboden herabließ und den getroffenen Punct zu den graduierten Kreisen in Beziehung brachte.

1. Die Länge des als Prisma dienenden Rohres konnte von $0{\cdot}15^{m}$ bis $4{\cdot}26^{m}$ ohne merklichen Einfluss geändert werden. Unterhalb der Länge von 1^{m} schien jedoch die Deutlichkeit des Maximums etwas zu leiden. — Der Durchmesser der Röhre betrug $0{\cdot}77^{mm}$ im Lichten.

2. Als Membranen dienten anfangs Häutchen, welche noch dünner als die gewöhnlichen aus Collodium sind; später wurden Collodiumhäutchen, mannigfache thierische Membranen, Papier und Glimmer als Diaphragmen verwendet. Dieselben blieben auf die Richtung der Schallstrahlen ohne merklichen Einfluss und änderten nur die Stärke des Schalles etwas ab.

3. Die atmosphärische Luft wurde bei den ersten Versuchen durch einen länger dauernden Strom des einzufüllenden Gases verjagt. Als sich auch Glimmerplatten als guter Verschluss statt der zarten Membranen erwiesen hatten, wurde das einzufüllende Gas in das mit Wasser gefüllte Prisma so lange geleitet, bis das Wasser verdrängt worden war. Bei Gasen, welche vom Wasser mäßig absorbiert werden (Ammoniakgas), musste das erste Verfahren beibehalten werden.

4. Als Beobachter wurden fein- und schwerhörige Personen gewählt. Die letzteren waren deshalb erwünscht, weil sie außerhalb der Richtung des Schallmaximums gar nichts hörten.

5. Die Versuche wurden für Wasserstoff-, Ammoniak- und Leuchtgas, für Kohlensäure, für schweflige Säure, Brunnenwasser und eine gesättigte Kochsalzlösung gemacht.

b) Hajech hat auf diesem Wege gefunden, dass die optischen Brechungsgesetze auch für den Schall ihre Anwendung finden. Verschiedene Töne sollen jedoch nach Hajech gleich gebrochen werden.

Tabelle von Hajech für die Schallbrechung.

Stoff im Prisma	Einfallswinkel	Brechungswinkel beobachtet	Brechungswinkel berechnet	Anmerkung.
Wasserstoff	35° 50′	8°	8° 50′	Die „beobachtete" Ablenkung enthält die mittleren Ergebnisse; die „berechnete" wurde aus dem Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten abgeleitet.
„	25	7	6 22	
Ammoniakgas	41	29 20′	30 22	
„	35 50	25	26 50	
Leuchtgas	35 50	25 40		
Kohlensäure	35 50	49 50	48 19	
„	25	33 20	32 33	
Schweflige Säure	35 50	62 30	61 22	
„ „	25	40	39 24	
Brunnenwasser	35 50	7 40	7 58	
„	25	5 40	5 37	
Gesättigte Kochsalzlösung.	35 50	6 15		
„ „	25	5 10		

c) Aus vorstehender Tabelle schließt Hajech: Sammellinsen für den Schall können sowol convex als concav construiert werden. Die ersteren wären jedoch mit Kohlensäure oder wahrscheinlich besser mit schwefeliger Säure; die letzteren hingegen mit Wasserstoff oder Wasser zu füllen.

105. Hajech's Prisma für die Refraction des Schalles, angefertigt und ausgestellt zu London 1862, von R. König in Paris. a) Eine wagrechte Messingröhre, welche an einem Ende mittelst einer lothrechten, am anderen Ende mittelst einer geneigten Membrane geschlossen ist, bildet das Prisma, welches man durch zwei Hähne mit einer tropfbaren Flüssigkeit oder einem Gase füllen kann. Der Ton, welcher durch das im Prisma enthaltene Schallmittel dringen soll, wird an einer Stimmgabel erregt, welche vor einer damit gleichgestimmten Resonanzröhre befestigt ist (§. 2, Anm. 3). Die beiden letzteren befinden sich vor der perpendiculären Membrane im Innern eines Kastens. Die Richtung, unter welcher der Ton am stärksten aus der geneigten Membrane hervortritt, wird leicht dadurch gefunden, dass man einen nach Helmholtz construierten und genau auf jene tongebende Stimmgabel abgestimmten Resonator (§. 4) im Kreise vor der schiefen Membrane herumführt, während man eine kleine Messingröhre, die durch eine Kautschukröhre

mit dem Resonator in Verbindung steht, in's Ohr hält. — Die Membranen sind auf losen Röhrenstücken gespannt, welche auf die das Prisma bildende Röhre passen. Der Kasten, welcher die Stimmgabel birgt, durch dessen eine Wand das Prisma geht, ist mit schallisolierenden Stoffen so ausgestattet, dass nur wenig von dem in demselben erzeugten Tone anders wohin als in das Schallprisma gelangen kann.

1. Der Resonator liegt auf einer Stütze, deren Axe durch den Mittelpunct der schiefen Membrane geht, derart, dass der Abstand der Mündung des Resonators von dem Centrum der Membrane sich nicht ändert, wie man ihn auch drehen mag.

2. Die Gabel wird von einem Hammer angeschlagen, der mittelst Drückens auf seinen aus dem Kasten hervorragenden Knopf gegen die Gabel anprallt und sie zum Tönen bringt.

b) In jüngster Zeit hat König [4]) diesen Apparat dahin abgeändert, dass man nun mit Bequemlichkeit beliebige Töne und Tonquellen dabei anwenden kann, natürlich muss dann auch der entsprechende Resonator eingeführt werden. Derselbe ist wie bereits beschrieben (vergl. *a*) angebracht. Mittelst einer Kurbel wird seine Unterlage und also er selbst zweckentsprechend gedreht und der Werth dieser Drehung durch einen Zeiger (ähnlich wie bei Fig. 9) angegeben. Es ist zugleich mit Hilfe einer schallisolierenden Hülle dafür gesorgt, dass der Resonator nur die aus dem Schallprisma kommenden Strahlen erhalten kann.

C. Die Änderung der Tonhöhe durch Bewegung.

106. Die Tonhöhe wird eine andere, wenn die Tonquelle oder der Beobachter sich schnell von oder gegen einander bewegen. a) Diesen Satz sprach zuerst Christian Doppler [1]) im Jahre 1842 bei Gelegenheit aus, als er den periodischen Farbenwechsel der Doppelsterne dadurch zu erklären suchte, dass er annahm, die Geschwindigkeit dieser Sterne sei nicht verschwindend klein gegen die Schnelligkeit des Lichtes und dass sich mit der schnellen Annäherung oder Entfernung der Doppelsterne an den Beobachter ihre Farbe (Schwingungszahl des Äthers, Analogon des Tones) ändere. Um nun für diese

Ansicht durch die Analogie eine Stütze zu finden, ging Doppler auf die Erscheinungen des Schalles zurück. Er suchte auf elementar-mathematischem Wege nachzuweisen, dass sich für den Beobachter ein Ton erhöhe oder vertiefe, je nachdem die Schallquelle dem Ohre rasch genähert oder von demselben schnell entfernt wird und umgekehrt. Das so gewonnene Resultat übertrug er dann auf den Farbenwechsel einer rasch bewegten Lichtquelle.

Da uns hier nur die Änderung der Tonhöhe durch die gegenseitige Bewegung der Schallquelle oder des Beobachters interessiert, so werden selbstverständlich die Anwendungen der Ergebnisse auf die Lichterscheinung unberücksichtigt bleiben [2]).

b) Nach Doppler gehen von der Tonquelle Stöße aus, die mit einer gewissen Geschwindigkeit fortgepflanzt, unser Ohr treffen. Wenn nun der Beobachter der Schallquelle entgegen eilt, so wird er in der Zeiteinheit (Secunde) mehr Schallwellen auffangen, als wenn er dieselben ruhend empfängt — für ihn wird dann der Ton erhöhet. Entfernt er sich rasch von der Schallquelle, so wird er aus entgegengesetzten Gründen den Ton tiefer vernehmen.

In ähnlicher Weise verhält es sich für das Ohr des Beobachters, je nachdem ihm die Tonquelle rasch genähert oder entfernt wird.

1. Ähnlicher Fall. Ein den Wasserwellen entgegenfahrendes Schiff erhält in derselben Zeit mehr Wellenstöße als ein ruhendes und letzteres mehr als jenes, welches in der Richtung der Wellen steuert.

2. Die Töne entstehen zwar nur bei den Sirenen aus Stößen. Da aber die Elementarwellen einer beliebigen Tonwelle mit gleicher Geschwindigkeit und ohne gegenseitige Störung fortschreiten und die Tonhöhe nur von dem Abstand beliebig gewählter Phasen abhängt, welche letztere sich als momentan, d. i. als „Stöße“ annehmen lassen; so ist Doppler's Voraussetzung zulässig.

107. Berechnung der scheinbaren oder subjectiven Tonhöhe. *a)* Die Tonquelle ruhet und der Beobachter bewegt sich rasch gegen dieselbe oder von derselben. Ruhen anfangs der Beobachter und die Schallquelle, so empfängt das Gehör des ersteren n Wellenstöße als jene Schwingungszahl,

welche objectiv dem Ton der Schallquelle entspricht. Eilt aber der Beobachter dem schallenden Körper mit einer Geschwindigkeit von a entgegen, so erhält er auch noch jene Anzahl n_1 Wellen, welche auf der von ihm beschriebenen Strecke a liegen. Ist nun die Geschwindigkeit des Schalles v, so hat man $a : v = n_1 : n$ und daraus $n_1 = \frac{an}{v}$, d. h. um so viel Wellenschläge erhält das beobachtende Ohr mehr, wenn es sich gegen die Tonquelle bewegt, im Vergleiche damit, wenn es ruhet und n Wellenimpulse in der Secunde aufnimmt. Der Beobachter vernimmt daher jetzt einen höheren Ton mit der subjectiven oder scheinbaren Schwingungszahl $n_2 = n + \frac{na}{v}$.

Entfernt sich hingegen der Beobachter von der Schallquelle mit derselben Geschwindigkeit a, so ist aus ähnlichen Gründen die scheinbare Schwingungszahl $n_2 = n - \frac{na}{v}$, mithin ist jetzt die subjective Wahrnehmung des Tones tiefer.

Ganz allgemein für den angenommen Fall lautet also die Formel $n_2 = n \pm \frac{na}{v}$, wo sich das positive Zeichen auf die Näherung des Beobachters an die Tonquelle, das negative auf dessen Entfernung von dem tönenden Körper beziehen.

b) Der Beobachter ruhet und die Schallquelle ist in Bewegung gegen ersteren oder von demselben. Ist dies der Fall, so erfolgen die späteren Vibrationen von anderen Puncten, als die früheren; sie erreichen daher auch den ruhenden Beobachter früher oder später, je nachdem die Tonquelle sich gegen ihn oder von ihm bewegt. Heißt v die Geschwindigkeit der Schallfortpflanzung und n die Schwingungszahl des Tones, so liegen n Wellen auf der Strecke v, wenn das tönende Instrument und der Beobachter ruhen. Bewegt sich jedoch ersteres gegen den ruhenden Beobachter mit der Geschwindigkeit a, so liegen die n Schallwellen nicht mehr auf der Strecke v, sondern auf jener $v—a$. Die Schwingungszahl n_2, welche der Strecke v entspricht, hat daher aus $v—a : n = v : n_2$ den

Werth $\frac{nv}{v-a}$. Da nun in dieser Formel die ursprüngliche Schwingungszahl n mit einer Zahl multipliciert wird, welche größer ist als jene, mit welcher man sie dividiert, so folgt, dass die scheinbare oder subjective Schwingungszahl n_2 größer ist als n, und dass also der Ton dem beobachtenden Ohr höher erscheint, als er es objectiv wirklich ist.

Für die Entfernung der Tonquelle ist a negativ und daher $n_2 = \frac{nv}{v+a}$, d. i. kleiner als n, und mithin ist jetzt die scheinbare Tonhöhe tiefer.

Die allgemeine Formel für diesen Fall ist folglich $n_2 = \frac{nv}{v \pm a}$, wo das Zeichen Minus für die Annäherung, das Zeichen Plus für die Entfernung gilt.

c) Durch Umformung der vorigen Formeln erhält man für den Fall *a* .... $n_2 = n\,(1 \pm \frac{a}{v})$ und für *b* .. $n_2 = \frac{n}{1 \pm \frac{a}{v}}$ woraus man leicht sieht: Wenn der Beobachter und die Tonquelle sich gegenseitig so bewegen, dass stets ihr Abstand gleich bleibt, so wird auch die Tonhöhe subjectiv nicht geändert.

Die von Doppler[3]) gebrachte Begründung obiger Sätze ist der Form nach anders als die hier aufgenommene Ableitungsweise.

Eine strengere Begründung dieser Sätze haben Professor Petzwal[4]) und Professor Mach[5]) gegeben; ersterer bestreitet jedoch ihre Giltigkeit, hauptsächlich aus dem Grunde, weil dabei die Strömung, welche durch die progressive Bewegung der Tonquelle erzeugt wird, nicht berücksichtigt sei. Mach hingegen bekämpft[6]) diesen und noch andere Einwürfe Petzwal's[7]).

108. Prüfung der Doppler'schen Theorie durch Versuche. *a*) Versuche auf Eisenbahnen. Die Erhöhung oder Vertiefung des Tones einer rasch bewegten Schallquelle oder, wenn der Beobachter sich schnell bewegt, hat Dr. Buijs Ballot[8]) auf der belgischen Eisenbahn zwischen Utrecht und Maarsen in folgender Weise nachgewiesen: Man schickte eine rasch fahrende Locomotive an drei Stationen vorüber, während man in letzteren oder auf der Locomotive einen constanten Ton blasen ließ, der von geübten Musikern beobachtet wurde. Immer er-

schien der ankommende Ton höher, der sich entfernende tiefer, und zwar, wenn die nothwendigen Correctionen eingeführt wurden, nahezu nach Doppler's Theorie.

In ähnlicher Weise hat M. Scott Russel [9]) in England die Eisenbahn zum erfahrungsmässigen Nachweise des Doppler'schen Satzes mit Erfolg benützt, ohne jedoch Doppler zu nennen [10]).

Bei Berechnung der Schallgeschwindigkeit wurden von Ballot alle Correctionen bezüglich des Baro-, Thermo- und Hygrometerstandes und der Stärke wie auch Richtung des Windes vorgenommen.

b) Wahrnehmung auf anderen schnellen Fahrzeugen. Nach August Seebeck findet sich in den Schriften seines Vaters eine Aufzeichnung, laut welcher letzterer den Ton einer Pfeife, welche auf einem bergabwärts rasch fahrenden Schlitten geblasen wurde, tiefer hörte, als der Schlitten bei ihm vorbei geeilt war.

In ähnlicher Weise hörte Dr. Mach [11]), wie der Ton einer an ihn mit nahezu constanter Geschwindigkeit vorüber pfeifenden Spitzkugel sich vertiefte.

Fizeau [12]) soll einen hier einschlagenden Versuch durch Umkehrung des Savart'schen Zahnrades mit Erfolg gemacht haben; es war jedoch nichts Bestimmtes darüber zu erfahren. Eine vielleicht ähnliche Vorrichtung behufs der Änderung der Tonhöhe durch Bewegung hat Dr. Mach [13]) angegeben; er kam jedoch durch dieselbe aus Mangel einer genügend großen Geschwindigkeit der bewegten Theile am Apparate zu keinem günstigen Resultate.

c) Dr. Mach's Apparat zum Nachweise der geänderten Tonhöhe durch Bewegung. Dr. Mach [14]), der sich für die Doppler'sche Theorie bezüglich der Änderung der Tonhöhe durch Bewegung so sehr interessierte, hat für deren Verificierung folgenden Apparat erdacht: Eine 6′ lange Stange *ab* (Fig. 93) ist der Länge nach ziemlich weit durchbohrt. Dieselbe ist um eine wagrechte Axe *rd* drehbar welche ebenfalls auf der einen Seite eine mit dem Rohre *ab* communicierende Bohrung besitzt. Das eine Ende des Rohres *ab* trägt ein kleines Zungenpfeifchen (pag. 148,

Fig. 93.

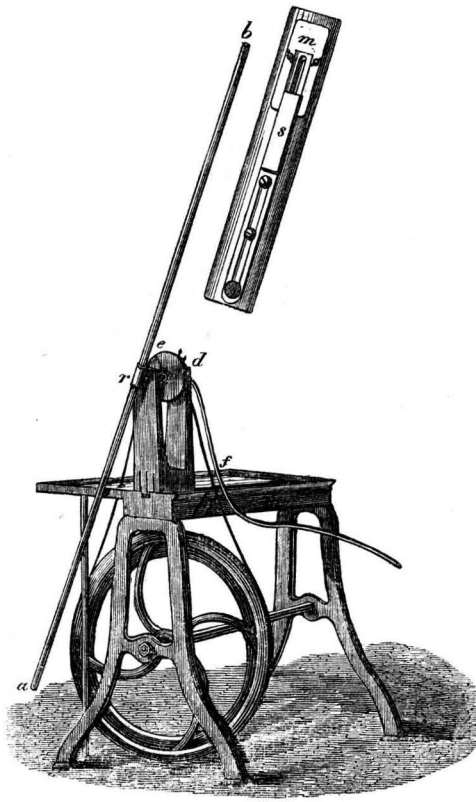


Fig. 78) von dem Tone a^1, so dass eigentlich das Rohr $a\,b$ eine Zungenpfeife darstellt. Versetzt man nun die Pfeife $a\,b$ durch die aus der Figur ersichtliche Vorrichtung in sehr rasche Rotation, so wird vermöge der sich entwickelnden Centrifugalkraft(inähnlicher Weise wie bei den Centrifugalventilatoren und Centrifugalgebläsen) Luft bei dem Zungenpfeifchen aus- und andere bei der Hohlaxe eintreten, mithin Luft durch die ganze Pfeife getrieben. In Folge dessen beginnt diese zu tönen, und zwar vernimmt man den Ton „schwebend“ (§. 17) vermöge der steigenden Tonhöhe, wenn sich das Zungenpfeifchen dem Beobachter nähert, und der sinkenden Tonhöhe, wenn sich die Tonquelle von ihm entfernt. Das sehr deutliche „Schweben“ des Tones entspringt also aus der Höhen-Differenz des variablen Tones. Bringt man hingegen das Ohr in die Verlängerung der hohlen Umdrehaxe, so hört man den Ton der Pfeife constant, also ohne Schwebungen, weil diesmal die rasch rotirende Tonquelle stets in gleichem Abstande vom Ohre bleibt. Dieser in seiner Höhe beständig bleibende Ton sticht scharf von jenem auf- und abschwebenden Ton ab, und wird

selbst durch die von den Zimmerwänden zurückgeworfenen „Schallwellen“ nicht gestört.

1. Die Ton-Differenz, oberflächlich mit Hilfe des Ohres bestimmt, kam bei Dr. Mach's Experimenten jener nach der Doppler'schen Theorie berechneten nahe. Dr. Mach ist eben daran, den Apparat so umzugestalten, dass man (§. 18) mit Hilfe der Schwebungen den Unterschied des Tones zu messen im Stande sein wird. Je rascher die Rotation, desto mehr steigert sich die Tondifferenz.

2. An der Stange *ab* war ein zu ihrer Axe senkrechter Stift befestigt, welcher jedesmal beim Vorübergehen an ein etwas entferntes elastisches Stäbchen schlug, das dann als Zählmarke diente. Für sehr rasche Rotationen könnte man an der Axe ein ähnliches Zählwerk, wie es bei den Sirenen vorkommt, verbinden.

3. Bei langsamen Rotationen treibt man die Luft mittelst eines Blasebalges und zugehörigen Schlauches durch die Pfeife.

4. In der Ebene der Rotation vernimmt man das „Schweben“ des Tones am stärksten. Leitet man jedoch, diesen günstigen Standpunct beibehaltend, von der hohlen Drehaxe aus ein Rohr zum Ohr, so vernimmt man durch das Rohr einen constanten Ton, während man ohne dasselbe die Tonschwankungen sehr deutlich hört. Diese Tonschwankungen können also nicht von Störungen in der Drehvorrichtung herrühren. Überdies fällt die Dauer eines Auf- und Abschwebens im Tone genau mit der Rotationsdauer zusammen.

5. Herr König, Fabrikant akustischer Apparate in Paris, hatte in London einen derartigen Mach'schen Apparat ausgestellt (1862).

6. Auch Professor Eisenlohr[15]) hat die Mach'schen Experimente mit einigen Variationen bezüglich der Form mit gutem Erfolge wiederholt.

7. Wesentlich bei Herstellung des Mach'schen Apparates ist, dass seine Canäle weit seien und das Zungenpfeifchen sehr leicht anspreche. Man kann jedes Ende mit einem Schnarrpfeifchen versehen. Da es jedoch vorzuziehen ist, stets nur eines anzublasen, so wird beim Versuche je eines derselben mit einer Schiebervorrichtung *s* (Fig. 93) geschlossen.

d) Nachweis mittelst vermehrter oder verminderter Stöße[16]). Sehr einfach und überzeugend für die Änderung der Tonhöhe durch Bewegung der Tonquelle oder des Hörenden sind folgende Versuche:

1. Man bewirke durch eine geringe Verstimmung (pg. 25), dass zwei auf getrennten Resonanzkästen befestigte und kräftig tönende Stimmgabeln von ursprünglich gleicher Tönhöhe (z. B. beide anfangs vom Tone c^2) einige Stöße, z. B. vier in der Secunde, mit einander geben, wenn beide, Tonquelle und der

Beobachter ruhen. Nähert man nun die etwas tiefer tönende Gabel (— c^2) um etwa 60 Centimeter dem Ohre, so hört dieses jetzt nur drei Stöße in der Secunde, was beweist (§. 18), dass das Ohr nunmehr eine Doppelschwingung mehr in der Secunde von ihr erhalten hat, dass also ihr Ton subjectiv um eine doppelte Schwingung für die gewählte Zeiteinheit vermehrt wurde.

2. Nähert man die etwas höher gestimmte Gabel (c^2) um etwa 60cm dem Ohre, so empfängt das Ohr fünf Stöße statt vier.

3. In solcher Weise kann man durch Nähern und Entfernen der Gabeln die Stöße um einen vermehren und vermindern, wobei man das nicht hörbar schlagende Metronom (pag. 146) oder ein Secundenpendel beobachtet.

4. Ein Ähnliches erfolgt, wenn man die beiden Gabeln etwas entfernt von einander aufstellt und zwischen ihnen hin- und hergeht, oder wenn man einen an einer Kautschukröhre befestigten, für denselben Ton (c^2) gestimmten Resonator hin- und herbewegt, wobei selbstverständlich das zweite Ende des elastischen Schlauches mit dem Ohre verbunden ist.

Diese Versuchsweise lässt sich mannigfach abändern und kann auch, wie in die Augen springt, dazu dienen, die Wellenlänge eines Tones und dessen Höhe näherungsweise zu bestimmen.

Ob nicht die oft sehr auffallenden Tonschwankungen [17]) der unser Ohr umschwirrenden Insecten in manchen Fällen hieher gehören? Und ebenso die Tonschwebung [18]) eines centrifugal im Kreise mit nahezu gleichmäßiger Geschwindigkeit geschwungenen Stabes oder einer Peitschenschnur?

Anhang,

enthält besondere Anmerkungen, Ergänzungen und den literarischen Nachweis.

Bei dem literarischen Nachweise wurden, wo es nur immer möglich war, die Poggendorff'schen Annalen besonders berücksichtigt, weil diese gewiss jedem Fachmanne zur Hand sind. Die Titel der citierten Werke sind der Kürze halber nur das erste Mal ausführlich angegeben.

Wo demnach der Leser auf eine Breviatur stößt, da ist, wenn er sich den betreffenden Titel des Werkes nicht gemerkt hat, eine frühere Citation aufzusuchen.

Am meisten sind die „Fortschritte der Physik" von der Berliner physikalischen Gesellschaft (Berliner Berichte) citiert. Diese trefflichen Schriften sollten, sowie Poggendorff's Annalen, in keiner Bibliothek fehlen; sie sind dem Fachmanne unentbehrlich. Da durch das Hindeuten auf die Berliner Jahresberichte der entsprechende Jahrgang für Chemie und Physik von Liebig und Kopp*) gewissermaßen mitcitiert ist, und das alphabetische Register und Inhaltsverzeichnis des bezüglichen Jahrganges den Leser sogleich auf den in Rede stehenden Gegenstand führen, so habe ich unterlassen, auf die Liebig'schen Jahrbücher zu verweisen.

Um zugleich dem Fachmanne die geschichtliche Wahrnehmung zu vermitteln, findet man bei den Citaten wenigstens eine der Jahreszahlen gesetzt. Diese bezieht sich dann auch in der Regel auf die anderen angerufenen Zeitschriften. Bei selbstständigen Werken wurde die Jahreszahl ihres Erscheinens wenigstens das erste Mal beigefügt.

Wenn der angerufene Artikel mehr als eine Seite enthält, habe ich, nach dem Vorgehen der „Berliner Berichte", in

*) Für Physik seit 1857 nicht mehr erschienen.

der Regel auch die Schlußseite angegeben, um so die Länge des Aufsatzes ersichtlich zu machen.

Citate zur Einleitung.

1. „Über die harmonischen Töne in Saiten“ von Mersenne in Harmonicorum Liber IV. Prop. 28. Paris 1636; Wallis in Philos. Transact. 1677. April; Sauveur Mem. de l'Academie de Paris 1701.

2. „Coëxistenz der kleinen Oscillationen“ von Daniel Bernouilli in Mémoires de Berlin 1753, pag. 147; dagegen d'Alembert in der französ. Encyklopädie, Artikel „*Fundamental*“ und Lagrange in Mém. de Turin I pag. 64 und 103; Whewell-Littrow, Geschichte der inductiven Wissenschaften, 1840, II. pag. 341 bis 343.

3. „Über die Erhaltung der Kraft“:

a) J. R. Mayer in Liebig's Annalen der Chemie, XLII, pag. 233. Äußerst interessant und der erste Artikel dieser Art.

b) Über die Erhaltung der Kraft etc. von H. Helmholtz, Berlin G. Reimer 1847.

c) J. R. Mayer über das mechanische Äquivalent der Wärme. Heilbronn 1851.

d) Über die Wechselwirkungen der Naturkräfte etc. von Helmholtz, Königsberg, Gräfe und Unger, 1854.

e) Das mechanische Äquivalent der Wärme etc. von A. Freiherrn von Baumgartner im Almanach der kais. Akademie der Wissenschaften. Wien 1856.

f) Über die Verwandlung der Kräfte von Justus v. Liebig, in den Vorträgen gehalten zu München im Winter 1858. Braunschweig, F. Vieweg, 1858. — Liebig's chem. Briefe, 4. Aufl. (1859), Bd. I. pag. 205.

g) Über Grundgesetze der Naturwissenschaft und ihre Geltung im praktischen Leben, von Dr. A. Freiherrn von Baumgartner in dem Berichte: Die feierliche Sitzung der kais. Akademie der Wissenschaften am 30. Mai 1860. In Commission bei C. Gerold's Sohn.

Citate zu I.
Die Resonatoren und der Vocal-Apparat.

1. Über Klangfarbe und Analyse des Klanges durch das Ohr: H. Helmholtz in seiner „Lehre von den Tonempfindungen.“ Braunschweig, Vieweg 1863; 2. Ausgabe 1865. I. Abtheilung.

Die Fortschritte der Physik im Jahre 1862 (gekürzt: Berliner Berichte oder Berl. Ber. 1862), XVIII. Jahrgang. Redigirt von Dr. E. Jochmann, pag. 144 bis 149.

Archives des sciences physiques et naturelles (gekürzt: Arch. d. sc. phys.). 2. Reihe XVII. pag. 194.

Über die Meinungs-Differenz bezüglich der Klangfarbe zwischen Ohm und Seebeck. Dove Repertorium der Physik (Dove Rep.) 1849 VIII. Artikel Akustik pag. 19 von A. Seebeck. Dove Rep. 1842 VI. pag. 5 und 6.

Poggendorff Annalen der Physik (Pogg. Ann.) G. S. Ohm 1843 LIX. pag. 513; 1844 LXII. pag. 1.

Pogg. Ann. A. Seebeck 1843 LX. pag. 449, 1844 LXIII. pag. 353 pag. 368.

„Cosmos" par Moigno (kurz: „Cosmos") 1862, XX. pag. 621 bis 623.

* Berlin. Ber. XV. pag. 172 bis 177. — Pogg. Ann. CVIII. (1859), pag. 280 bis 290. Schlömilch Zeitschrift für Mathematik und Physik, (Z. S. f. Math.) 1859 pag. 78 bis 80. Gelehrte Anzeigen der k. bayr. Akademie (München gel. Anz.) XLVIII pag. 537 bis 541; 545 bis 549; 553 bis 556. Annales de chimie et de physique par Chevreul etc. (Ann. d. chim.) 3e. Serie, LVIII. pag. 249 bis 253.

The London, Edinburgh and Dublin philosophical Magazine and Journal of science (Phil. Mag.) 4. Reihe, XIX, pag. 81 bis 88. Zeitschrift für die gesammten Naturwissenschaften, Berlin (Z. S. f. Naturw.) XIV. pag. 208 bis 209.*

2. Brandt. Über die Verschiedenheit des Klanges (Klangfarbe) in Pogg. Ann. CXII (1861) pag. 324 bis 336.

Schlömilch Zeitschrift für Mathematik und Physik (Z. S. f. Math.) 1862, pag. 125 bis 127. Berl. Ber. für 1861, XVII. pag. 151 bis 156.

3. Rameau im Vorworte seines Buches „Noveau système de musique, théorique, Paris 1726. Über die Verstärkung des Klanges der menschlichen Stimme. E. Seiler: Altes und Neues über die Ausbildung des Gesangorganes. Leipzig 1861, pag. 52.

4. Über Resonatoren; siehe die Schriften in Note 1, zwischen beiden Sternchen. — Müller-Pouillet Physik, 6. Aufl. 1863, I 477.

5. Töne mittelst Muscheln, siehe: Dove, über das Hörbarmachen von Beitönen in Pogg. Ann. CXV (1862) pag. 650. Weber Wellenlehre pag. 521.

6. Über die von König angefertigten Resonatoren; siehe Helmholtz, Tonempfindungen, Beilage I. pag. 561 bis 562, Verzeichnis der Resonatoren, sammt beigesetzten Eigentönen und Dimensionen. — Les Mondes 1865, VII. pag. 645; ferner König, Catalog akustischer Apparate, Paris 1865. Herr König wohnt jetzt 30, Rue Hautfeuille Paris.

7. Variable Resonatoren. Pisko im „Österr. Bericht über die internationale Ausstellung in London, 1862, herausgegeben von Professor Dr. Joseph Arenstein"; Wien 1863, Classe XIII. pag. 400, Spalte 2.

Ob sich nicht solch' ein variabler Resonator für Ärzte als Stethoskop zur Analyse der Brustgeräusche eignen würde?

8. Sondhaus in Pogg. Ann. 1860, CIX. pag. 10. Anm.; Berl. Ber. 1860, XVI. pag. 125. Programm der Realschule zu Neiße 1859. Die Tonbezeichnung der Fremdvölker: Daguin Physique 2. Aufl. 1861 I. pag. 510.

9. Membranen als klanganalysierende Mittel; siehe Helmholtz „Tonempfindungen" pag. 71 bis 73.

10. Das Clavier als Vocal-Apparat; siehe: Helmholtz „Tonempfindungen" pag. 111.

11. Partialtöne der menschlichen Stimme; siehe: Helmholtz „Tonempfindungen" pag. 88.

12. Aeolsharfe in Marbach's oder Gehler's physikalischem Lexicon, Artikel: „Aeolsharfe". Daselbst findet man auch die Nachweise der einschlagenden Literatur.

13. Theorie der Zungenpfeifen in Helmholtz „Tonempfindungen" pag. 153 bis 163. Berl. Ber. für 1862; XVIII. 149 und für 1861 XVII. pag. 164 bis 168. Helmholtz in Pogg. Ann. 1861, CXIV. pag. 321 bis 327. Presse scientifique des deux mondes, Paris 1861, pag. 281 bis 282. — Helmholtz in Crelle's Journal für Mathematik 1859, LVII. pag. 1 bis 72 Berl. Ber. für 1859, XV. pag. 130 bis 148.

14. Zur Theorie der menschlichen Stimme und der Vocale. Helmholtz „Tonempfindungen" pag. 159 bis 181. Berl. Ber. für 1862, XVIII. pag. 149 bis 151.

Dove Repertorium der Physik 1839, III. pag. 80. Robert Willis transact. of Cambridge Philos. Soc. III. pag. 231. Pogg. Ann. 1832 XXIV. p. 397. Wheatstone darüber in der „London and Westminster Review 1837," October. — Whewell Geschichte der inductiven Wissenschaften; Stuttgart 1840, II. pag. 357.

Über Willi's Versuche und Theorie der Vocale: Helmholtz „Tonempfindungen" pag. 178 bis 180. Artikel „Stimme" im physikalischen Lexicon von Marbach, 2. Auflage, VI. pag. 133 bis 140. Hier findet man auch die einschlagende Literatur verzeichnet. — Die Ergänzung dieser Literatur ist aus „Dove's Repertorium der Physik" und aus den Berl. Ber. Cap. Akustik aus allen Jahrgängen leicht zusammenzustellen.

Über die Stellung der Mundtheile bezüglich der Vocale: J. H. du Bois-Reymond Kadmus oder allgemeine Alphabetik, Berlin 1862 pag. 152. Derselbe in der norddeutschen Zeitschrift 1812, redig. von de la Motte Fouqué.

Brücke. Über eine neue Methode der phonetischen Transscription in Wiener akad. Bericht, philosoph. Classe 1863, XLI. pag. 223 bis 285 und als Separat-Abdruck bei Gerold, Wien 1863. Brücke über die sogenannten harten und weichen Consonanten in „Zeitschrift für die österreichischen

Gymnasien 1863," XIV. pag. 247 bis 258 und Raumer über denselben Gegenstand ibid. pag. 81 bis 94. In beiden Aufsätzen findet man in reichem Maße die einschlagende Literatur verzeichnet.

15. Kempeln. Mechanismus der menschlichen Sprache, nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine. Wien 1794.

16. Über Faber's Sprechmaschine, Pogg. Ann. 1843 LVIII. pag. 175.

17. Helmholtz „Tonempfindungen" über Donder's Abstimmung der Mundhöhle, pag. 171, sammt älterer Literatur in der Note.

König fertigt fünf Stimmgabeln sammt zugehörigen Resonatoren für die Stimmung der Mundhöhle bezüglich der Vocale *a*, *e*, *i*, *o* und *u*. Flüstert man sehr leise einen dieser Vocale, während man die entsprechende Stimmgabel vor die Mundhöhle hält, so vernimmt man die Resonanz der von letzterer umschlossenen Luft sehr auffallend.

18. Helmholtz Tonempfindungen, pag 172, Note.

19. Helmholtz der Vocalapparat in seinen Tonempfindungen p. 184 bis 196 und Beilage VII. pag. 583 bis 586. Ferner Note zwischen beiden Sternchen. Pisko im Berichte über die Industrieausstellung zu London 1862, herausgegeben von Prof. Dr. J. Arenstein, Wien 1863. Classe XIII. pag. 400, Spalte 2. Les Mondes 1865, VII. pag. 644 bis 646; ferner König, illustr. Catalog akustischer Instrumente, Paris 1865.

20 Neef'scher oder Wagner'scher Hammer, in jedem größeren Lehrbuche der Physik im Capitel „Elektrodynamische Induction" zu finden.

König liefert einen galvanischen Unterbrechungs-Apparat (Fig. 6, pag. 22) mit Gabeln für $c—^2$, $c—^1$, c^0, welche als Unterbrecher dienen können. Wenn man die Gabeln $c—^2$ als Unterbrecher wählt, so kann man zeigen, wie die Gabeln $c—^1$ und c^0 von jener reguliert werden — vorausgesetzt, dass diese letzteren zwischen die beigegebenen Elektromagnete wie beim Vocal-Apparat (Fig. 6, pag. 22) aufgestellt werden.

21 u. 22. Das Stimmen der Gabeln. Auf ähnlichem Princip beruhet der Gebrauch einer und derselben Stimmgabel für verschiedene Tonhöhen nach E. Greaves. An der betreffenden Stimmgabel wird ein silbernes Klötzchen bis zu Feilstrichen verschoben, welche durch Versuche für die betreffenden Töne vorher bestimmt worden sind. Näheres darüber in: Berl. Ber. 1853, IX pag. 166. Polytechnisches Centralblatt (Polyt. C. Bl.), 1853, pag. 382. Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie (Bull. d. l. Soc. d'enc) 1854, pag. 583. — Amtlicher Bericht der Londoner Industrieausstellung I. und II. pag. 819.

23. „Extraströme." Nachzusehen in jedem größeren Lehrbuche der Physik, Capitel „Galvanische Induction."

24. Du Moncel. Ruhmkorff's Inductions-Apparat. Deutsch bearbeitet von Bromeis und Bockelmann. Frankfurt a. M. 1857, pag. 26 bis 27.

Helmholtz „Tonempfindungen", pag. 53, Absatz 3.

25. Theorie der Resonanzröhren von Helmholtz und über die Phasenänderung bei denselben durch theilweisen Verschluss der Mündung: Helmholtz Tonempfindungen, pag. 190 und 191; ferner Beilage VIII. pag. 586 bis 589. Berl. Ber. für 1859, XV. pag. 130 bis 148. Crelle's Journal für Mathematik, 1859, LVII. pag. 1 bis 72. Über die Beurtheilung des Phasenverhältnisses, Helmholtz pag. 191 mit Hilfe der Tabelle.

26. Das Ohr und die Klangfarbe. Helmholtz Tonempfindungen pag. 196 bis 223. Ein schönes Modell des menschlichen Ohres im vergrößerten Maßstabe mit allen Details, auch der Nerven, liefert Dr. Auzoux; siehe über derlei „elastische Modelle" für den Unterricht Pisko im Österreichischen Berichte der Londoner Industrie-Ausstellung 1862 pag. 579.

27. Die Lehre von den specifischen Energien der Sinnesnerven in Johann Müller's Handbuch der Physiologie. 4. Aufl., I. Bd. p. 667 u. s. w.

Citate zu II.

Vielstimmige Sirenen.

1. Über Schwebungen. Bindseil Akustik 1839 pag. 620. Pogg. Ann. 1834, Bd. XXXII. (ganze Folge CVIII) pag. 333 u. s. w. Helmholtz Tonempfindungen pag. 245 u. s. f.

2. Scheibler das Geschwindigkeitsgesetz der Stöße in Pogg. Ann. 1834, Bd. XXXII. pag. 493 u. s. f.

3. Interferenzbilder für die Stöße. Pogg. Ann. 1834, Bd. XXXII. pag. 520 „Zusatz". Dove Repertorium der Physik 1839, III. Band, Tafel I, Fig. 1. Lithographiertes Blatt, die Schwebungen versinnlichend; ausgegeben von Scheibler (ohne Jahreszahl). Akustik von Bindseil pag. 620 und 621; besonders die Literatur in Note 4.

4. Theorie der Combinationstöne. Young in Philosophical Transactions 1800, T I. pag. 106 bis 150; besonders pag. 130.

Hällström in Pogg. Ann. 1832 XXIV. pag. 438 und in Beziehung auf die höheren Ordnungen der Combinationstöne als Gegner Hällström's Pogg. Ann. 1834 XXXII. pag. 522.

Röber in Pogg. Ann. 1834 XXXII. pag. 493 bis 503.

Ältere Theorien: Chladni, Akustik 1802, pag 207.

Lagrange in Misc. taurin. I. Bd. pag. 103 bis 105.

Zusammenstellungen und Literatur: Artikel Combinationston in den physikalischen Lexica Gehler und Marbach.

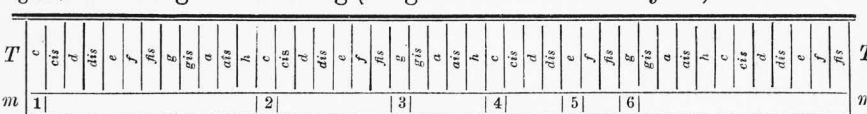
Bindheil Akustik 1839, pag. 670 bis 679 mit Literatur.

5. Helmholtz über Combinationstöne 1856, Bd. XCIX. p. 497 bis 540. Berl. Ber. 1856, pag. 279 bis 285. Zeitschrift für Naturw. VIII. pag. 524 bis 528. Verhandlungen des naturhist. Vereines der Rheinländer 1856, p. 75 bis 77. Archives d. criences phys. XXXIV. pag. 141 bis 145. Il nuovo cimento, 1856 V. pag. 284 bis 289. Berl. Ber. für 1856. XII. Jahrg. p. 203 bis 217 mit Gegenbemerkungen.

Bezüglich einer theilweisen Versinnlichung der Helmholtz'schen Theorie der Combinationstöne, siehe Schulze Wellenapparat in Pogg. Ann. 1857. C. pag. 587 bis 589.

Helmholtz hat gezeigt, dass die von den Obertönen herrührenden Stöße Ursache der Dissonanz werden. Zur Consonanz ist ein Zusammenfallen der Obertöne der verschiedenen Klänge nothwendig (vergleiche dieses Buch §. 24).

Fig. 94.



Hier mag nun ein von Dr. Prof. Mach erdachtes, einfaches Versinnlichungsmittel bezüglich des Zusammen- oder Nichtzusammenfallens der Obertöne eines Klanges und der entsprechenden Schwebungen Platz finden. Mittelst dieser Methode wird man leicht im Voraus die Consonanz oder Dissonanz zweier Klänge beurtheilen können: „Wenn man von den geringen Unterschieden der reinen und temperirten Stimmung absieht, kann man das Zusammenfallen der Theiltöne in der Consonanz zweier Klänge durch ein sehr einfaches Modell anschaulich machen.

Eine Claviatur (Fig. 94), in welcher alle Tasten gleich breit sind, wird durch *T T* vorgestellt, *m m* und *n n* sind zwei an derselben verschiebbare Leisten. Die mit 1, 2, 3, 4 bezeichneten (quadratisch geformten) Marken der Leisten bezeichnen die Partialtöne eines Klanges. Jede Leiste hat die Eigenschaft, dass sie an irgend eine Stelle der Claviatur gebracht, immer die zusammengehörigen Theiltöne eines Klanges angibt. Beide zusammen machen also unmittelbar anschaulich, ob bei irgend einem Intervall Partialtöne zusammenfallen oder nicht.

Die Möglichkeit einer solchen Darstellung beruht darauf, dass in unserem Modell die Tastenabstände nahezu den Differenzen der Logarithmen der Schwingungszahlen proportional gehen. Wollte man ganz genau verfahren, so müsste man auf die Leisten *mm* und *nn* Längen auftragen, welche den Logarithmen der Schwingungszahlen der Partialtöne, nach der Basis 2, proportional wären, wobei der Octavenabstand als Längeneinheit dienen würde (Dr. Mach)".

Es wird gut sein, wenn der Leser sich eine weitergehende Claviatur *T T* und die entsprechenden Streifen *mm* und *nn* nach der angegebenen Regel verfertigt, und zwar die beiden letzteren beweglich; er wird dann leicht mittelst zweckmäßiger Verschiebung alle Fragen über die reine Consonanz leicht beantworten können und die Seite 44 (Anmerkungen 1 bis 4) von Helmholtz angegebenen Consonanz-Grade bestätigt finden.

Um die Stöße der harmonischen Töne neben jenen der Grundtöne zu beobachten, bringt man zwei c^0-Pfeifen mit langsamen Schwebungen (§. 17 und 18) zum Tönen und beobachtet nach und nach mit der kleinen Resonator-Reihe (pag. 11).

Die Stöße einer c^0-Pfeife mit einer c^1-Pfeife werden durch den Ton 2 (ersten Oberton) der c^0-Pfeife und den Grundton der c^1-Pfeife hervorgebracht. Man beobachte sie mit dem Resonator c^1.

Die Stöße einer c^0-Pfeife mit einer g^0-Pfeife werden vom Ton 4 der c^0-Pfeife und vom Ton 2 der g^0-Pfeife erzeugt; man verwendet hier den Resonator g^1.

Für Pfeifen c^0 und e^0 dient der Resonator e^2,
" " c^1 " e^0 " " " e^1,
" " c^1 " g^0 " " " g^2,
" " c^0 " g^0 " " " h^2,

d. i. Nr. 15 aus der großen Resonator-Reihe (pag. 11). Für ein größeres Publicum wendet man die Resonatoren mit Flammen an (pag. 203, Fig. 91).

6. Sirene von Caignard de la Tour ursprünglich in Gilbert's Annalen der Physik 1827 LXXXVI, pag. 274; in einer Note besprochen, besonders bezüglich der Theorie der Umdrehung.

7. Opelt's Sirene. Über die Natur der Musik von Opelt. Plauen 1834, pag. 9. Marbach's physikalisches Lexicon, 2. Aufl. VI. pag. 399.

Berl. Ber. für 1852, VIII, pag. 154, bei Besprechung des Werkes Opelt F. W. allgemeine Theorie der Musik.

König liefert einen große Opelt'sche Pappscheibe mit 24 Lochröhren, welche auf jeder Rotationsmaschine leicht fest zu machen ist. Dreizehn dieser Lochreihen geben einfache Töne, 5 die verschiedenen Tonintervalle und 4 die Accorde. Das Ansprechen dieser Scheibe geschieht mittelst eines Röhrchens von 1 bis 3 mm Durchmesser.

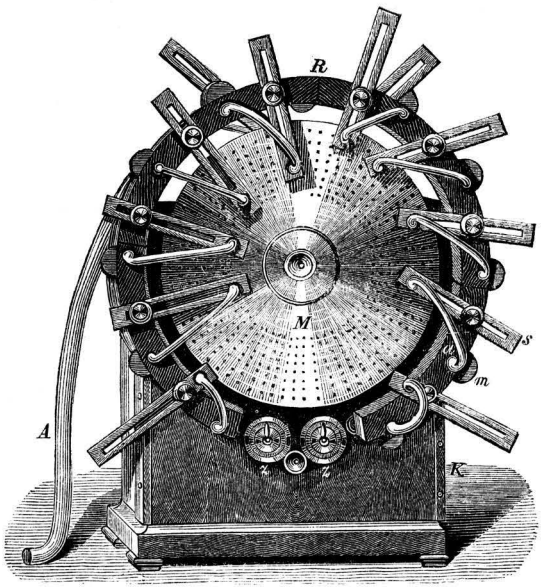
Für die Erzeugung discontinuirlicher Töne verfertigt König 8 Hölzer, welche die enharmonische Tonreihe erzeugen, wenn man sie nach einander zu Boden wirft (tönende Stäbe); ferner 4 derartige Stäbe für einen Accord; 4 Röhren, welche einen Accord geben, wenn man sie nach einander entstöpselt; 4 aus Pergament gefaltete Klatschvorrichtungen, welche einen Accord hören lassen, wenn man sie nach einander mit großer Kraft plötzlich auseinander faltet („Klatsch- oder Knall-Düten"). Ein Gleiches kann man mit verschieden langen Peitschen bewirken. (Wright's Peitschen-Concerte in Nordamerika.)

8. Seebeck's Sirene in Dove Repertorium der Physik, 1849 VIII, p. 25 bis 27. Pogg. Ann. 1841 LIII. pag. 417.

Eine neuere Construction der Seebeck'schen Sirene verdanken wir dem Akustiker König in Paris. Die Seebeck'schen Scheiben verfertigt König aus Messing; er gibt seinem Apparate 9 solche Scheiben bei. Die erste derselben zeigt 8 Reihen Löcher, entsprechend der diatonischen Dur-Scala; die zweite besitzt ebenfalls 8 Löcherreihen für die harmonischen Töne; die nächsten vier Scheiben dienen zur Demonstration der Resultate, wenn der Isochronismus der Impulse auf irgend eine Art gestört ist; mit der siebenten Scheibe lässt sich nachweisen, dass die Impulse von verschiedenen Puncten ausgehen und dennoch einen Ton erzeugen können; die achte Scheibe ist für Interferenzversuche bestimmt und endlich die neunte für die „Schwebungen."

Jede dieser Scheiben *M* lässt sich (Fig. 95) an einer aus einem Kasten herausragenden Axe befestigen, welche von einem in letzterem befindlichen Uhrwerk beliebig rasch herumgedreht werden

Fig. 95.



kann. Für die Regulierung und Messung der Umlaufsgeschwindigkeit der Scheiben ist eine eigene Vorrichtung (Zählwerk *zz*). Um den vom Triebwerke herrührenden Lärm auszuschalten, hat der Kasten doppelte Wände und der Zwischenraum enthält die besten Schall-Isolatoren.

Für das gleichzeitige Anblasen mehrerer Löcherreihen von der einen oder der anderen Seite der Scheiben besteht folgende Einrichtung:

In einiger Entfernung von den Scheiben ist (Fig. 95) an dem Kasten eine kreisförmige Windlade *R* angebracht, welche durch einen Kautschukschlauch *A* mit einem guten Blasetisch verbunden ist. In diese kreisförmige Windlade münden in gleichem Abstande von einander 10 oder 12 kleinere Kautschukröhren *a*, welche mittelst einer eigenen hölzernen oder messingenen Schiebervorrichtung *s* (ähnlich der am Phonautographen (Fig. 25) vor einer der Lochreihen festgestellt werden kann.

Behufs des Ansprechens der Sirene muss die zu jedem der kleineren Röhrchen gehörige Klappe *m* geöffnet werden,

damit die Luft aus der kreisförmigen Windlade in das Röhrchen einzuströmen im Stande sei. Da diese Sirenenscheibe aus einem gemeinschaftlichen Blasetisch und aus derselben Windlade angeblasen wird, so dürfte sie sich auch zum Hervorrufen deutlicher Combinationstöne, etwa in dem Grade wie bei der Physharmonica eignen (vergl. pag. 47). König fertigt auch einfachere Seebeck'sche Sirenen mit Uhrwerk, 7 Pappscheiben und 3 Blasröhrchen.

9. Dove's vielstimmige Sirene in Pogg. Ann. 1851 LXXXII pag. 596 bis 598. Berl. Ber. für 1851, VI. pag. 311 und 1852 VIII pag. 154 bei der Besprechung von Opelt's Theorie der Musik.

10. Interferenz des Schalles in Marbach's Lexicon der Physik. 2. Aufl. IV. pag, 191 bis 205. Daselbst findet man auch die einschlagende Literatur verzeichnet. Ferner Daguin Physique, 2e Edit. pag. 481 bis 483 mit einem neuen Interferenz-Apparat von Lissajous.

Zwei nebeneinander befindliche, gleichgestimmte, von Elektromagneten in Vibration versetzte Stimmgabeln (pag. 22, Fig. 6), hat König als Interferenz-Apparat benützt. Man hört ihren Ton verstärkt oder geschwächt, wenn man in gleiche Distanz von beiden steht, je nachdem der elektrische Strom bei beiden die gleiche oder entgegengesetzte Richtung hat (pag. 29). Im letzteren Falle sind auch die Schwingungsphasen entgegengesetzt und daher der entsprechende Ton geschwächt oder aufgehoben (pag. 48). Bei ungleichem Abstand von beiden bekommt man Zwischenstärken. Der Intensitäts-Zustand in verschiedenen Abständen bei gleichen oder entgegengesetzten Schwingungsphasen kann mittelst einer gespannten Membrane und darauf gestreutem Sand (pag. 12) untersucht werden. — Ähnlich geschieht die Untersuchung bei dem neuen Interferenz-Apparat von Desains. In einem Kästchen befindet sich ein Pfeifchen, welches von außen angesprochen werden kann. Die Decke des Kästchens hat zwei zum Pfeifchen symmetrisch liegende Öffnungen, welche nach außen gewissermaßen die gleichen Schallquellen sind. Um Schallreflexionen zu vermeiden, ist das Kästchen im Innern gepolstert.

11. Vielstimmige Doppelsirene in Helmholtz Tonempfindungen pag. 241 u. s. f. König bringt am Zählwerk dieser Sirene zugleich ein Uhr-

werk an, welches gleichzeitig mit diesem seinen Gang beginnt und einstellt; auch gibt er dieser Sirene einen genauen Windregulator bei.

Mit der Helmholtz'schen Doppelsirene kann man folgende reine oder für Stöße berechnete Intervalle bei beliebigem Phasenzustande erzeugen: den Einklang, die Octave, Quinte, Quarte, die große und kleine Terz, die Seconde oder das Intervall des ganzen Tones, ferner den halben Ton.

Die Doppelsirene von Helmholtz (Fig. 9, pag. 49) kann auch dazu dienen, um zu zeigen, dass für die Bestimmung der unteren Grenze hinsichtlich der absoluten Schwingungsanzahl noch vernehmbarer Töne (30 Doppelschwingungen), die letzteren einfach sein müssen, weil man sonst durch die harmonischen Obertöne irre geleitet werden könnte. Wenn man nämlich die Klänge immer tiefer werden lässt, so nimmt die Empfindlichkeit des Ohres für den Grundton so rasch ab, dass man zuletzt die nächst höheren Obertöne deutlicher hört, obwol die Schwingungsweiten des Grundtones mächtiger als jene der nächsten Obertöne sind. Bei Bestimmung der oberen Grenze (36.000 Doppelschwingungen) der Schwingungsanzahl ist dies nicht zu fürchten, und man wendet hiezu bekanntlich das Princip der sehr rasch umlaufenden Zahnsirene an. Und nun zur Bestimmung jener unteren Grenze!

Setzt man an der Helmholtz'schen Doppelsirene die Zwölferreihe in Thätigkeit und dreht zugleich den oberen Kasten, so bekommt man (pag. 53, oben) bei einem vollen Umlauf des letzteren für den Grundton 4, für den ersten Oberton 8, für den zweiten 12 Stöße u. s. w. Wenn man die Scheiben sehr langsam rotieren lässt, etwa für weniger als 46 Stöße per Secunde, während man den oberen Kasten dreht; so vernimmt man 12 Stöße bei einer ganzen Umdrehung des Kastens. — Diese rühren also von den zweiten Obertönen her; bei Stößen zwischen 40 und 80 bekommt man die 8 Stöße des ersten Obertones und erst, wenn die Stöße 80 übersteigen, bekommt man 4 Stöße, welche vom Grundton herkommen (Helmholtz Tonempfindungen). Hiedurch ist also bewiesen, dass schon unterhalb 40 Doppelschwingungen die untere Grenze der noch

hörbaren Töne liegt. Dasselbe lehrt folgender Versuch: Auf einem allseitig geschlossenen Resonanzkasten ist eine Saite gespannt, welche in der Mitte mit einem Gewicht belastet ist, und bei welcher in Folge dessen der erste Oberton um einige Octaven vom Grundton abliegt, wodurch also die stärkeren Obertöne eliminiert erscheinen. Die Luft im Kasten steht mittelst eines Kautschukschlauches in Verbindung mit dem Ohr. Versetzt man die Saite in Schwingung, so hört man den Grundton sehr stark, so lange seine Schwingungszahl noch einigermassen weit über 40 ist; bei 37 Schwingungen in der Secunde wird er schon sehr schwach und fast intermittierend, und endlich bei 31 Schwingungen hört man ihn gar nicht mehr.

Citate zu III.

Zur Vibrographie.

1. Wilhelm Weber, Erfinder der Phonautographie, siehe: Dr. Franz Melde, Lehre von den Schwingungscurven. Leipzig, Barth 1864, pag. 83, §. 17. Schilling musikalisches Lexicon, Stuttgart 1830, I. Band, Artikel Akustik von Wilhelm Weber.

2. Duhamel Vibroscop: Cours de Physique de l'école polytechnique. Par M. J. Jamin. Paris 1859. Tome II., pag. 448.

Traité élémentaire de Physique. Par P. A. Daguin. (Unstreitig das vollständigste, empfehlenswertheste Lehrbuch der Physik.) Deuxième édition. Paris, 1861. Tome I. pag. 494.

Der Apparat mag wegen der äußeren von Duhamel angegebenen Einrichtung nach diesem Gelehrten benannt worden sein. Der diesem Instrumente zu Grunde liegende Gedanke scheint jedoch von Savart herzustammen. Im Collège de France findet man nämlich unter den älteren Apparaten einen solchen Cylinder, dessen sich Savart zu ähnlichen Studien bedient hat. Jedenfalls muss der Deutsche Wilhelm Weber (siehe Note 1) als Erfinder der Vibrographie angenommen werden.

3. Das dirigierende Pendel ist wie bei den elektromagnetischen Zeit-Telegraphen oder galvanischen Zeitmessern eingerichtet. Hierüber gibt jedes grössere Lehrbuch der Physik Aufschluss.

4. Wertheim's Vibrograph, siehe: Jamin Physique II. pag. 449. Daguin Physique, 2. Edit. I. pag. 614.

5. Tampon nach Scheibler; siehe Annales de Chimie et de physique (gekürzt Ann. d. chim.) 1849; 3. Reihe, XXVI. pag. 93.

6. Stimmgabel-Apparat für combinierte Schwingungen, siehe: Melde, die Lehre von den Schwingungscurven. Leipzig, Barth, 1864; (eigentlich gegen Ende 1863), pag. 87, wo das Princip derartiger Apparate besprochen wird.

7. Vibrograph von Laborde; siehe Application du principe de l'enregistration des vibrations moléculaires à l'étude de divers plénomènes physiques. Cosmos 1860, XVII. pag. 48 bis 52; pag. 156 bis 158. Ferner in den „Fortschritten der Physik im Jahre 1860. Redigiert von Dr. E. Jochmann." (Berl. Ber.) XVI. pag. 161 bis 163.

8. Phonautograph von Scott; siehe: Moigno im Cosmos 1859, XIV. pag. 314 bis 320. Cosmos 1859, XV. pag. 677 bis 679. Cosmos XX, p. 658. The Athenaeum (gekürzt Athen.) vom Jahre 1859, 2. Abtheilung, pag. 433. Report of the british Association (gekürzt Rep. of Brit. Assoc.) vom Jahre 1859, 2. Abtheilung pag. 62. Berl. Ber. für 1859, XV. pag. 167 und 168. Müller-Pouillet Physik, 6. Auflage, 1863, I. 439 u. 465. Über die Gesetze des Mitschwingens. Von Dr. Ernst Mach. Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Wien (gekürzt: Wiener akadem. Ber.) 1863. Band XLVII. 2. Abtheilung pag. 33 bis 49.

9. Savart's Gesetze für schwingende Membranen, siehe Ann. d. chim. 2e série T. XXXII. pag. 384 bis 399. Rindseil Akustik 1839, pag. 268 bis 283. Schwingungsarten der Membranen, wo man in den Noten einen reichen literarischen Nachweis findet. Dieses Werk zeichnet sich überhaupt durch Angabe der Literatur aus, und ist daher sehr zu empfehlen.

10. Poisson in den Mémoires de l'Acadèmie, Paris. Band VIII. pag. 510.

11. Lamé. Leçons sur l'élasticité. Par Lamé pag. 131.

12. J. Bourget et F. Bernard „Sur les vibrations des membranes carrées"; siehe: Ann. d. chim. 3e série; Band LX. pag. 449 bis 479. Cosmos 1860, XVII. pag. 379 bis 380. Cosmos XX. 1862, pag. 658. Presse scientifique des deux mondes. (Gekürzt: Presse scient.) 1. Abth. pag. 315. Zeitschrift für die gesammten Naturwissenschaften (gekürzt: Z. S. f. Naturw.), Band XVII. pag. 176 bis 177. Daguin Physique 2. Edit. Tome I. p. 595 bis 598. Berl. Ber. 1860, XVI. pag. 148 bis 155.

13. Marx Studien über die Schwingungen der Membrane in Bindseil's Akustik pag. 268 bis 283, an verschiedenen Stellen.

14. Pisko im Programm der Oberrealschule Wieden 1863, pag. 13.

15. Donder's, F. C. Zur Klangfarbe der Vocale (mittelst König's Membran-Phonautograph) in Pogg. Ann. 1864 CXXIII. pag. 527 bis 528.

16. E. L. Scott. Phonautograph et fixation graphique de la voix. Cosmos 1859, XIV. pag. 314 bis 320.

17. Desains hat mittelst des photoelektrischen Mikroskopes die Tonschriften einem größeren Auditorium ersichtlich gemacht; siehe Cosmos 1864. XXIV, pag. 547.

18. Fixierung der Klangfiguren. Berl. Ber. VI. pag. 311.

Für ein größeres Publicum kann man die Bilder der Klangfiguren durch eine Linsen - Combination an die Zimmerdecke projicieren. Die Sichtbarmachung der Knotenpuncte an Saiten und Stäbe durch „Reiterchen“ und Ringe aus Papier ist allgemein bekannt.

19. Sichtbarmachung der Wellen an tönenden Platten. In der im Texte angegebenen Weise sind Örsted, Wheatstone, die Gebrüder Weber und Faraday vorgegangen, die Wellen an Platten und Glocken sichtbar zu machen. Die Literatur hierüber siehe: Bindseil-Akustik pag. 248 und 386. Auch diese Wellen können gut beleuchtet und ihre Bilder projiciert werden.

Hieher gehört auch: Melde. Eine neue Art von Klangfiguren durch Flüssigkeitstropfen gebildet. Pogg. Ann. 1860 CIX. pag. 147 bis 148.

20. Helmholtz Tonempfindungen pag. 35.

21. König hat auf Anregung des Dr. Pollitzer, mit diesem als er in Paris war, die erwähnte Arbeit unternommen. Wir haben noch eine einschlagende, schöne Arbeit von Dr. Pollitzer und Prof. Mach zu erwarten. Siehe Wien, akad. Berichte, 1863 XLVIII. pag. 300.

22. König's akustisches Album; siehe Cosmos 1862, Tome XX. pag. 661. Berl. Ber. für 1862, XVIII. pag. 137. König akust. Catalog 1865, pag. 42.

23. Telephon von Reis im Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt a. M. für 1860 — 1861, pag. 57 bis 64. Müller-Pouillet Physik 1863, 6. Auflage, II pg. 352, Fig. 325. — Berl. Ber. für 1861 XVII. pag. 171 bis 173.

Der Musiktelegraph in der „Gartenlaube“ 1863, Nr. 51, pag. 807 bis 909. Aus der Natur 1862, XXI. pag. 470 bis 484; König's Catalog 1865, pag. 5.

24. Galvanisches Tönen. Wertheim in Ann. chim. 1848 [3] XXIII p. 302. Einen literarischen und historischen Nachweis über das galvanische Tönen findet man in der Schrift: „Über Töne und einige Bewegungserscheinungen im Schliessungsbogen des galvanischen Stromes“ Von Dr. Edmund

Reitlinger. Wien, akad. Ber. XLV. pag. 453—482. Ferner Marbach physikalisches Lexicon, 2. Auflage, Band IV. pag. 782 bis 784 und Band VI. pag. 426, Absatz 4. Daselbst findet man auch die einschlagende Literatur verzeichnet.

25. Pepper. Transmission du son à distance par des tringles en bois Cosmos 1856, VI. pag. 282. Berl. Ber. für 1855, pag. 215.

26. Hier mag der Prospectus Platz finden, welchen der Erfinder Herr Ph. Reis den von ihm gelieferten, durch den Mechaniker Herrn Albert in Frankfurt angefertigten Apparaten beigibt:

„Telephon. Jeder Apparat besteht, wie aus Fig. 60, pag. 96 ersichtlich, aus zwei Theilen, dem eigentlichen Telephon A und dem Reproductionsapparat *C*. Diese beiden Theile werden in solcher Entfernung von einander aufgestellt, dass das Singen oder das Tönen eines musikalischen Instrumentes auf keine andere Weise, als durch den Apparat von einer Station zur anderen gehört werden kann.

Beide Theile werden unter sich und mit der Batterie *B* wie gewöhnliche Telegraphen verbunden. Die Batterie muss hinreichen, auf Station *A* die Anziehung des Ankers an dem seitlich angebrachten Elektromagneten zu bewirken. (3—4 sechszöllige Bunsen'sche Elemente genügen für mehrere Hundert Fuß Entfernung.)

Der galvanische Strom geht alsdann von *B* nach der Klemme *d*, von hier durch das Kupferstreifchen an das Platinplättchen auf der Mitte der Membrane, alsdann durch den Fuß (bei *D*, Fig. 60) des Winkels nach der Schraube *b* in deren kleine Grube man ein Tröpfchen Quecksilber bringt. Von hier geht der Strom alsdann durch den kleinen Telegraphier-Apparat *e—f*, dann zum Schlüssel der Station *C* und durch die Spirale über *i* nach *B* zurück.

Werden nun hinreichend starke Töne vor der Schallöffnung *S* erzeugt, so kommen durch die Schwingungen derselben die Membrane und das auf ihr liegende winkelförmige Hämmerchen in Bewegung; die Kette wird für jede volle Schwingung einmal geöffnet und wieder geschlossen und hierdurch werden auf Station *C* in dem Eisendraht der Spirale

ebensoviele Schwingungen hervorgebracht, welche man dort als Ton oder Tonverbindung (Accord) wahrnimmt. Durch festes Auflegen des Oberkästchens auf die Spiralenachse werden die Töne auf *C* sehr verstärkt.

Ausser der menschlichen Stimme können (nach meinen Erfahrungen) noch ebensogut die Töne guter Orgelpfeifen von $F-\overline{\overline{c}}$ und die des Claviers reproduciert werden. Zu letzterem Zwecke stellt man *A* auf den Resonanzboden des Claviers. (Von 13 Dreiklängen konnte ein geübter Experimentator 10 ganz genau wieder erkennen.)

Was den seitlich angebrachten Telegraphierapparat anbelangt, so ist derselbe zur Reproduction der Töne offenbar unnöthig; aber er bildet eine zum bequemen Experimentieren sehr angenehme Zugabe. Durch denselben ist es möglich, sich mit dem vis-à-vis recht gut und sicher zu verständigen.

Es geschieht dies etwa auf folgende einfache Weise:

Nachdem der Apparat vollständig aufgestellt ist, überzeugt man sich von der Continuität der Leitung und der Stärke der Batterie durch Öffnen und Schließen der Kette, wobei auf *A* Anschlagen des Ankers und auf *C* ein sehr vernehmliches Ticken der Spirale gehört wird.

Durch rasch abwechselndes Öffnen und Schließen auf *A* wird nun bei *C* angefragt, ob man zum Experimentieren bereit, worauf *C* in derselben Weise antwortet.

Einfache Zeichen können nun nach Übereinkunft von beiden Stationen durch 1, 2, 3, 4maliges Öffnen und Schließen der Kette gegeben werden, z. B.

1 Schlag = Singen
2 Schläge = Sprechen u. s. w.

Wörter telegraphiere ich dadurch, dass ich die Buchstaben des Alphabetes nummerire und ihre Nummern dann mittheile.

1 Schlag = *a*,
2 Schläge = *b*,
3 „ = *c*,
4 „ = *d*,
5 „ = *e* u. s. w.

z würde demnach durch 25 Schläge angezeigt.

Diese Zahl Schläge würde aber zeitraubend darzustellen und unsicher zu zählen sein, weshalb ich für je 5 Schläge einen Dactylusschlag setze, dann ergibt sich:

— 0 0 für e,

— 0 0 und 1 Schlag für f u. s. w.

z = — 0 0, — 0 0, — 0 0, — 0 0, — 0 0, was schneller und leichter auszuführen und besser zu verstehen ist.

Noch besser ist es, wenn man die Buchstaben durch Zahlen bezeichnet, welche sich umgekehrt verhalten, wie die Häufigkeit ihres Vorkommens."

27. Dr. E. Mach. Zur Theorie des Gehörorganes. Wien. akad. Ber. 1863, XLVIII. 2. Abth. pag. 283 bis 300. Laut Wien. akad. Anzeigers 1865, XII. 80, wird die Fortsetzg. in Wien. akad. Ber. 1865 aufgenommen.

Das leichte Mitschwingen der Membranen hat König angewendet, um ein neues Stethoskop für Ärzte zu schaffen. Zwei Membranen sind so verbunden, dass sie mit Luft aufgeblasen, eine kleine Schall-Linse (von etwa 5^{cm} Öffnung) geben. Diese ist in einer halbkugelförmigen Kapsel gefasst, von welcher ein beliebig langer, als Communicationsröhre wirkender Kautschukschlauch zum Ohre geht. Die Schall-Linse schmiegt sich an die zu untersuchende Brust leicht an, nimmt die Schallschwingungen auf und leitet sie weiter. Dieses Stethoskop ist nach König's Angabe sehr empfindlich. König versieht dasselbe auch mit mehreren Schläuchen, um bei Consilien die gleichzeitige Beobachtung mehreren Ärzten zu ermöglichen.

Dieses Instrument soll auch für die Wahrnehmung des Gesprochenen, des Gesanges und der Musik bessere Dienste als das gewöhnliche Hörrohr leisten. Wenn die Schall-Linse ober dem Clavierdeckel gehalten wird, so wird die Wahrnehmung besonders deutlich; nur ist dann der Übelstand zu beseitigen, dass die Klänge jener Saiten, welche gerade unterhalb der Schall-Linse liegen, stärker hervortreten. Die gleichzeitige Anwendung mehrerer solcher Schall-Linsen, welche eine längliche, gemeinschaftliche Fassung und ein gemeinsames Zuleitrohr für das Ohr haben, eliminieren diese Störung. Ursprüng-

lich hatte König diese Schall-Linse mit einem Resonator von veränderlichem Luftvolum (pag. 8, *b*) verbunden, um so die Brustklänge zu analysieren; er bekam ein verneinendes Ergebnis.

Über dieses Stethoskop Gazette des Hopitaux, 1864 Nr. 61, p. 243. — Cosmos 1864, XXV, p. 12. — Pogg. Ann. 1865 CXX 473. — König akust. Catalog 1865, p. 51.

Citate zu IV.
Zur optisch-akustischen Methode.

1. Lissajous, optisch-akustische Methode in Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences (gekürzt: Compt. Rend.) 1855, Tome XLI. pag. 93 bis 94; pag 814 bis 817. XLIII. pag. 973 bis 976. XLIV. pag. 727. XLV. pag. 48 bis 52.

Sehr ausführlich als „Mémoire sur l'étude optique des mouvements vibratoires" par M. J. Lissajous in Ann. d. chim. 1857, 3e serie, T. LI. pag. 147 bis 231 mit zwei Kupfertafeln.

Cosmos 1855, VII. pag. 81 bis 83; pag. 608 bis 609. Cosmos 1859. IX. pag. 626 bis 629. Cosmos 1857, XI. pag. 80 bis 83; pag. 110 bis 112; pag. 431 bis 432.

Ferner in: L'Institut journal universel des sciences et de Sociétés savantes en france et à l'étranger (gekürzt: L'Institut) für 1855, pag. 402 bis 403; für 1856, pag. 411 bis 412.

Archives des sciences physiques et naturelles, Géneve (gekürzt: Arch. phys.) Tome XXX. pag. 159 bis 161.

Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie national (gekürzt Bull. d'encour.) für 1856 pag. 699 bis 705.

The literary Gazette and Journal of archaeology, science and art (gekürzt: Liter. Gaz.) für 1857, pag. 694.

Il nuovo cimento, Giornale di fisica, di chimica e scienze affini (gekürzt. Cimento) VI. pag. 67 bis 70.

Z. S. f. Naturw. VII. pag. 63 bis 64. Berl. Ber. für 1855, XI. p. 209 bis 212. Berl. Ber. für 1856, XII. pag. 221 bis 234.

Sehr ausführlich und mit Erweiterungen für schiefwinklige Combinationen in Melde, Lehre von den Schwingungscurven, pag. 9 bis 30; pag. 51 bis 83 und dabei sehr zu beachten Tafeln V bis XI. (vergl. Note 4).

Daguin Physique 2e edit. Tome I, pag. 517 bis 522. Jamin Physique, II. pag. 526 bis 529. Müller-Pouillet, Physik, 6. Auflage 1864, I. p. 432 bis 437.

Helmholtz Tonempfindungen pag. 138 bis 141, ferner p. 193 bis 195.

Über das Princip der optisch-akustischen Apparate angewendet auf Flüssigkeiten: Melde Schwing. pag. 89.

2. Taumatropisches Princip. Siehe dieses in jedem größeren Lehrbuche der Physik oder Physiologie, das Capitel vom Sehen.

3. Thermophon (Wackler, Wieger), von Trevelyan 1829 zufällig entdeckt; siehe Marbach physikalisches Lexicon, VI. pag. 421 bis 426, mit einschlagender Literatur. Ferner Berl. Ber. 1850, VI. und VII pag. 311; 1851, X. pag. 216; 1860, XVI. pag. 176 bis 178; 1862, XVIII. pag. 109 bis 113. Z. S. für Naturw. XXI. pag. 337. Schneider Pogg. Ann. 1862, CXVII. pag. 622 bis 627.

4. Abbildungen der akustischen Lichtfiguren von Lissajous. Eine Tabelle mit den Figuren für die Tonverhältnisse, Unison (1 : 1); Octave (1 : 2); (1 : 3); Quinte (2 : 3) und Quarte (3 : 4) findet man in Ann. d. chim. 1857 LI. Pl. II. Dasselbe in Jamin Physique Pl. III. Dasselbe Melde Schwing. Tafel VI.; überdies für dieselben Verhältnisse bei geradlinigen Schwingungen, welche sich unter Winkeln von 45° kreuzen, Melde's Schwingungscurven, Atlas Tafel V.; für Winkel = Null Tafel VII.; für Zusammensetzung einer geradlinigen mit einer elliptischen Vibrationsbewegung für verschiedene Werthe der Schwingungszahlen, Tafel VIII, IX und X.

5. Zur Theorie der akustischen Lichtfiguren von Lissajous. Helmholtz Tonempfindungen pag. 141. Lissajous in Ann. d. chim. 1857, Tome LI. pag. 164 bis 173. Berl. Ber. 1856, XII. pag. 225, Melde, Schwing. pag. 163 bis 174.

6. Akustische Lichtfiguren mittelst Zungenpfeifen von Wolf in l'Institut 1862, pag. 393. Berl. Ber. für 1862, XVIII. pag. 140.

7. Das „Vibrations-Mikroskop" in Helmholtz Tonempfindungen, pag. 138. Melde Schwingungen, pag. 74 bis 83. — Müller-Pouillet, 6. Aufl. 1864, I. 438 und 478.

Das Vibrations-Mikroskop von Helmholtz unterscheidet sich im Wesentlichen von dem Lissajous'schen Comparator nur dadurch, dass seine Stimmgabel von einem intermittierenden Elektromagnet in Schwingung versetzt wird. Der letztere wird von einer Unterbrechungsgabel (Fig. 6, pag. 22) dirigiert. Die Lage der Stimmgabel, welche das Objectiv trägt, sowie des Ocularträgers liegen hier wagrecht. König liefert auch billige Vibrations-Mikroskope, deren Gabeln sich mit einem Contrabassbogen oder mit einem Tampon erregen lassen.

8. Lissajous amtliche Abstimmung der Stimmgabeln in Compte-rendu. annuel. St. Petersburg 1860, 50. Berl. Ber. für 1861; XVII. 150.

9. Young, Erfinder des optisch-akustischen Verfahrens; siehe: Philosophical Transactions of the Royal Society of London (gekürzt: Philos. Transact.) fürs Jahr 1800, pag. 125; pag. 149 und Tafel VI. Gilbert's Annalen XXII. 1806, p. 365 bis p. 374 sammt Tafel IX. Melde Schwing. p. 1.

10. Kaleidophon von C. Wheatstone in Pogg. Ann. 1827, LXXXVI. Bd. der ganzen Reihe, oder Bd. X. 2. Reihe, p. 470 bis 480. Schweigger's

Journal 1827, L. pag. 490, mit Figuren. Quarterly Journal of Science. New Serie T. II. pag. 344.

Gehler's neu bearbeitetes physikal. Lexicon, Band V, Abtheilung II. pag. 811, mit Figur. Marbach physikal. Lexicon, 2. Auflage, Band IV. pag. 185, mit Zeichnung.

11. Melde's Kaleidophon. Über einen neuen Apparat zur Darstellung von Schwingungscurven, Melde in Pogg. Ann. 1862, CXV. pag. 117 bis 125; ferner Melde, die Lehre von der Schwingung, pag. 25 bis 30; ferner ibid. pag. 53 bis 65. Presse scientifique des deux mondes 1862, 2. Heft, pag. 33 bis 35. Zeitschrift für Naturw. XX. pag. 213 bis 215. Berl. Ber. für 1862, XVIII. p. 113 bis 114. — Müller-Pouillet 6. Aufl. I, 429.

12. Melde, Lehre von den Schwingungen. Cap. II., III. und IV. pag. 31 bis 62.

13. Melde, Lehre von den Schwingungen. Atlas, Tafel V. bis XI. (Ende).

14. Eisenlohr's Apparat zur rechtwinkligen Combination von Schwingungen. Melde, Lehre von den Schwingungen pag. 72. Eisenlohr's Lehrbuch der Physik, 9. Aufl. Cap. Schall. König, Catalog für Akustik, 1865, pag. 50, Nr. 240.

15. G. Mos, Apparat zur Combination rechwinklig gegen einander gerichteter Schwingungen. Über ein Pendel zur fasslicheren Erklärung der Lissajous'schen Schallfiguren. Pogg. Ann. 1864, CXXI. p. 646 bis 650.

Mos, Eisenlohr und Wheatstone's Apparate versinnlichen ganz gut die senkrecht combinierten Schwingungen. Stellt man zwei Wheatstone'sche Apparate (pag. 123, Fig. 73) einander gegenüber, von welchen ein jeder gesondert eine Ellipse erzeugt und lässt auf das Spiegelchen des einen Apparates einen Lichtstrahl fallen, der es auf das Spiegelchen des zweiten Apparates wirft; so erhält man die Combinationsfigur für zwei elliptische Schwingungen; in ähnlicher Weise combiniert man eine elliptische und eine gerade Schwingung. Die Lichtbilder können auch auf einem weißen Papierschirm aufgefangen werden. — Mittelst einer beiden Apparaten gemeinschaftlichen Vorrichtung lässt sich das Geschwindigkeitsverhältnis der beiden elliptischen Componenten abändern.

König, Catalog für Akustik 1865, pag. 50, Nr. 241. Diese Apparatchen leisten also Ähnliches, wie die „Wellenmaschinen" (Wellen-Apparate) von Wheatstone, Eisenlohr (dessen Lehrbuch 9. Auflage, Abschnitt „Wellenbewegung"), vom Mechaniker Fessel in Köln (Marbach, physikal. Lexicon, 2. Auflage V. pag. 434; darüber Plücker, Pogg. Ann.

LXXVIII. pag. 421; Beer höhere Optik, pag 178 bis 184; pag. 403 bis 408). Hieher gehören ferner: der vorzügliche Wellenapparat für Optik und Akustik vom Orgelbauer Schulze zu Paulinzell in Thüringen; beruhend auf den Principien der Wheatstone- und Fessel'schen Wellenmaschine; aber auch für longitudinale und stehende Schwingungen (Marbach physik. Lexicon. 2. Auflage VI. pag. 951; Pogg. Ann. 1857, C, pag. 583 bis 589; Zeitschrift für Naturk. IX. pag. 470; Berl. Ber. für 1857, XIII. p. 179; König, Katalog für Akustik 1865, pag. 49, Nr. 235); die Müller'schen stroboskopischen Wellenscheiben (Marbach physikal. Lexicon, 2. Aufl. VI. pag. 150) und endlich Gerling's Wellenapparat, vorzüglich für Polarisation des Lichtes, Darstellung aller Polarisationsbewegungen und einer zweiten verwandten Wellenbewegung durch Zusammensetzung zweier Schraubenbewegungen nebst Nachrichten von einem Apparate dazu, von Professor Gerling in Marburg. (Pogg. Ann. 1858. CV. pag. 175 bis 210; Cosmos XIV. pag. 149). — Pierre Wellenmaschine Berl. Ber. für 1861 XVII. p. 173.

Citate zu V.

Schwingende Saiten.

1. Phonoskop nach Plassiart im Cosmos 1862, XX. pag. 700. Berl. Ber. für 1862, XVIII. pag. 138. Pisko im achten Jahresberichte der Wiener Communal-Oberrealschule auf der Wieden, 1863, pag. 24. König's Catalog für Akustik, Paris 1865, pag. 51.

2. F. Melde. Über die Erregung stehender Wellen eines fadenförmigen Körpers. Pogg. Ann. 1860, CIX. pag. 193 bis 215 und Fortsetzung. CXI. pag. 513 bis 537. Zeitschrift für Naturw. 1860, XV. pag. 332. Berl. Ber. für 1860, XVI. pag. 137 bis 148. — Müller-Pouillet 6. Aufl. I. 414 bis 415.

3. Dove H. W. Erregung von Tönen mittelst Elektromagnetes in Pogg. Ann. 1852, LXXXVII. p. 139 bis 142. Helmholtz Tonempfindungen 186.

4. Melde in Pogg. Ann. 1860, CXI. pag. 522 bis 533. Berl. Ber. für 1860 XVI, pag. 143 bis 148.

5. Melde Lehre von den Schwingungscurven. Atlas, die zweiten Horizontalreihen der Tafeln V bis XI.

6. Siehe die Werke in Note 2.

7. Melde. Über Fadenschwingungen mittelst zweier Stimmgabeln, in Pogg. Ann. 1860, CIX. pag. 214 und CXI. pag. 514 und pag. 536. Les Mondes 1865, VII. pag. 649 und König, illustrierter Catalog für Akustik, Paris 1865, pag. 47.

König gibt dem Melde'schen Apparat 5 Stimmgabeln bei, von welchen die beiden tiefsten, übereinstimmenden, mit Stimmschiebern versehen sind.

8. Melde in Pogg. Ann. 1860, CIX. pag. 193 bis 202. Berl. Ber. für 1860, XVI. pag. 137 bis 139.

9. Melde. Über eine Methode, den Schwingungsvorgang sichtbar zu machen, sowie deren Anwendung bei glockenförmigen Flächen. Pogg. Ann. 1860, CIX. pag. 43 bis 59. pag. 198. Zeitschrift für Naturw. 1860. p. 52. Berl. Ber. für 1860, XVI. pag. 133 bis 136.

Strehlke in Pogg. Ann. 1837, XL. pag. 146—148; ferner in Dover's Repertorium der Physik. 1839 III. pag. 126.

Citate zu VI.

Tönende Stäbe.

1. Scheibler's Stimm-Methode und Tonmesser, siehe Munke in Pogg. Ann. 1833, Band XXIX (ganze Folge 105) pag. 390 bis 403.

Eine ausführliche und sehr klare Darstellung vom Professor Röber in Pogg. Ann. 1834, Band XXXII (CVIII der ganzen Reihe) pag. 333 bis 363; dann pag. 492 bis 520; ferner Prof. Röber übersichtlich in Dove's Repertor. 1839 III. pag. 1 bis 52.

Vincent. Theorie der Stöße und Anwendung derselben zum Stimmen in Ann. de chim. 1849; dritte Reihe XXVI. pag. 37 bis 106 und Berl. Ber. 1849, V. pag. 101 bis 109.

Mémoires de la société des sciences de Lille 1856. Cosmos 1862, XXI. pag. 109 bis 112.

Anleitung die Orgel unter Beibehaltung ihrer momentanen Höhe oder nach einem bekannten a vermittelst des Metronoms nach Stößen gleichschwebend zu stimmen, 16 Seiten und eine Tabelle, versinnlichend die Operationen beim Stimmen der Orgel nach der Rechnung Scheibler's, von ihm selbst ausgegeben (ohne Jahreszahl).

Anleitung, die Orgel vermittelst der Stöße (vulgo Schwebungen) und des Metronoms correct gleichschwebend zu stimmen. 8 Seiten. (Ohne Jahreszahl.)

Über mathematische Stimmung, Temperatur und Orgelstimmung nach Vibrations-Differenzen oder Stößen; 20 Seiten und eine Figurentafel, wo Figur 1 die Stöße versinnlicht (vergl. Anm. 3, in II. p. 231.). (Ohne Jahreszahl.)

Löhr: Über die Scheibler'sche Erfindung überhaupt und dessen Pianoforte- und Orgelstimmung insbesondere. Crefeld bei Schüller, 1836.

2) Über Stöße, siehe pag. 231, II. Note 1 bis 3.

3. Über Scheibler's Stimm-Apparat und Tonmesser, angefertigt von König, siehe Cosmos 1862, XXI. pag. 109 bis 112. — Berl. Ber. für 1862 XVIII, pag. 135, nebst einer treffenden Gegenbemerkung zum Referate im Cosmos von „Rb."

Die Gabeln des von König angefertigten Tonmessers sind auf Resonanzkästen befestigt und tönen so lange, dass man nahezu während $1\frac{1}{2}$ Minuten die „Stöße“ zu zählen vermag. Ist mit dem Tonmesser die Höhe eines Tones zu messen, so nimmt man aus der Gabelreihe jene zwei Gabeln, welche ihm an Höhe und Tiefe zunächst kommen, und indem man die entstehenden Stöße zählt, erhält man die gesuchte Schwingungszahl (§. 72, pag. 149). Liegt der zu bestimmende Ton nicht zwischen c^1 und c^2, so wird er mit Hilfe der Octaven auf die Tonleiter c^1 zurückgeführt.

Sind z. B. eine Reihe Stimmgabeln nach der temperierten Scala irgend eines a^1 anzufertigen, so berechnet man nach diesem a^1 die Töne der Reihe c^1 und die Stöße, welche sie mit den entsprechenden Gabeln des Tonmessers zu geben haben. Hierauf feilt man die anzufertigenden Gabeln in zweckmäßiger Weise (pag. 25), bis sie die berechneten Stöße wirklich geben.

Die behufs der Scheibler'schen Stimmung von König angefertigten Hilfsgabeln bilden selbstverständlich untereinander keine genau temperierte Scala, da ja eine jede von dem richtigen Ton um vier Doppelschwingungen abweicht.

4. Über die örtliche und zeitliche Verschiedenheit der Tonhöhen siehe Bindseil Akustik pag. 624 bis 625. — Daguin Physique, 2. Edit. Tome I. pag. 510. — Compte rendu ann. Petersb. 1860, pag. 50. — Wiener akad. Ber. XXV pag. 172 bis 184. — Berl. Ber. für 1857, XIII, pag. 193; ferner für 1861, pag. 150.

Chladni hatte vorgeschlagen (Akustik, Leipzig 1830, §. 29) den Tonleitern das c^1 mit $512 = 2^9$ einfachen Schwingungen zu Grunde zu legen, indem dann auch die Schwingungszahlen eines jeden anderen c als Potenzen von 2 erscheinen, was in mancherlei Beziehung bei Rechnungen Vortheile gewährt. Aus diesem Grunde findet man häufig die Normal-Stimmgabeln der Physiker und Akustiker auf $c^1 = 512 = 2^9$ einfachen Schwingungen gestimmt, obwohl schon zu Chladni's Zeiten das c^1 der Musiker etwas höher war und später noch gesteigert wurde. Auch König geht in der Regel bei Anfertigung seiner Apparate vom $c^1 = 512$ einfachen Schwingun-

gen aus, wenn es nicht ausdrücklich anders begehrt wird. Das „Tableau général des nombres de vibrations simples de la série des sons musicaux“ von König ist berechnet nach der temperierten Scala für die Normal-Stimmung der Physiker $c^1 = 512$ einfachen Schwingungen, ferner für $a^1 = 870$ einfachen Schwingungen (officielle Stimmung in Frankreich, Österreich und Russland) und für $a^1 = 888$ einfachen Schwingungen (deutsche und englische Stimmung, vergl. pag. 147). Überdies enthält diese Tafel die Wellenlängen der zu $c^1 = 512$ einfachen Schwingungen gehörigen Töne in der temperierten Tonleiter und die Grenzen für die meisten musikalischen Instrumente und der menschlichen Stimme.

5. Über Scheibler's Tonmesser siehe die Werke unter Note 1; ferner: Der physikalische und musikalische Tonmesser etc. Erfunden und ausgeführt von H. Scheibler, Seidenwaren-Manufacturist in Crefeld. Essen bei G. D. Bädecker. 1834. 8°. VIII. und 80 Seiten, mit einer Kupfertafel und fünf Tabellen.

Mittheilungen über das Wesentliche des musikalischen und physikalischen Tonmessers, von Heinrich Scheibler; Crefeld, Bädecker in Essen 1836. 8°. 14 Seiten. (Ein Resumé hiervon in französischer Sprache, als Manuscript von Scheibler's Hand stand Vincent zu Gebote.)

Merkwürdig ist eine ältere Äusserung von Dr. Smith über Orgelstimmung durch Schwebung in a lettre to Mr. Nicholson; siehe darüber a Course of Lectures on natural philosophy and the mechanical arts 1807, from Thomas Young, Vol. II. pag. 610. Ferner Phil. Transact 1802, und endlich: Smith Robert: Harmonics or the philosophy of musical sounds 8° Cambridge 1749; edit. II, London 1759; edit. III, 1762 [with a postscript upon the Mangeable Harpsichord (eine Art Clavier, Spinett)]. Mir stand nur die zweite Auflage (mit 28 Kupfertafeln) zu Gebot. Ein höchst interessantes Buch, sowol was die Stimmung mittelst Stößen betrifft, als auch bezüglich der Theorie der Consonanz und Dissonanz, zurückgeführt auf die Stöße (vergl. vorliegendes Werk, Cap. II). Das Zusammengehörige findet man im Index pag. 281 unter „Beats“ (Stöße) und „Consonances“. Auch in vielen anderen akustischen Dingen ist dieses Werk höchst interessant und sehr lehrreich, besonders hinsichtlich der trefflichen Lehrmethode.

6 und 7. Siehe Munke und Röber in der Note 1.

8. Siehe Citat 5.

9. Nach meinen in Paris gemachten Erfahrungen; siehe auch Cosmos 1862, XXI, pag. 111.

10. Savart über die alternierenden Knotenlinien in Ann. d. chim. 2. Serie 1820 XIV, pag. 113—171; ferner 2. Serie 1837 LXV, pag. 337—402. Comptes rend. 1858 XLVI. pag. 775 bis 778; ferner pag. 975 bis 978.

Daguin Physique 2. Edit. I, pag. 602 bis 605.

11. Seebeck über die alternierenden Knotenlinien in Dove's Repertor. 1842. VI, pag. 59 bis 68; ferner 1849, VIII. pag. 52—54.

12. Terquem über die alternierenden Knotenlinien in Ann. de chim. 3. Serie, 1859, LVII, pag. 129—190.

Berl. Ber. für 1858, XIV, pag. 151 bis 153; ferner pag. 154 bis 156; ausführlicher Berl. Ber. für 1859, XV, pag 148—158. — Compt. rend. LV. 1862 pag. 283 bis 284. — Berl. Ber. für 1862 pag. 283, dann Daguin Physique 2. Edit. I. pag. 605 bis 608.

König liefert vier Messingstäbe für den Nachweis der Coëxistenz von Längen- und Querschwingungen und gibt zwei auf Metallplatten befestigte Korkstege bei.

a) Der eine Stab ist so gestimmt (hat solche Dimensionen), dass sein Longitudinalton um die zwei harmonischen Quertöne, welche der Stab zu geben vermag, abliegt. Die transversale Erregung bringt hier die entsprechenden Knotenlinien der Transversaltöne sehr scharf zum Vorschein, während bei der longitudinalen Erregung keine deutlichen Linien erscheinen.

b) Beim zweiten Stab nähert sich der Longitudinalton um mehr als einen der beiden harmonischen Transversaltöne.

Wenn nun der Stab transversal erregt wird, so erhält man die Knotenlinien sehr deutlich, welche dem Transversalton entsprechen.

Bei Hervorrufung des Longitudinaltones treten ebenfalls die Knotenlinien für den Transversalton auf, aber alternierend (pag. 153, Fig. 79), ein Beweis, dass bereits Longitudinal- und Vibrationschwingungen gleichzeitig bestehen.

c) Beim 3. Stabe ist der Longitudinalton mit dem Transversalton nahe im Einklang. Jede der beiden Erregungsweisen ruft hier die alternierenden Transversalknotenlinien hervor (pag. 153, Fig. 79) und keine anderen.

d) Bei vollkommenem Einklang des Längen- und Quertones wird jede der beiden Erregungsarten schwierig.

Für den Nachweis des „rauhen Tones“ (pag. 154, *d*), liefert König folgende Stäbe aus Messing: Nr. 1. Bei demselben ist der Longitudinalton um eine Octave höher als der Transversalton, welchem n Knotenlinien entsprechen.

Nr. 2. Ein Stab wie vorhin, aber für $(n + 1)$ Knotenlinien des Transversaltones.

Nr. 3. Von einer Mittellänge zwischen beiden. Bei der longitudinalen Erregung nun lassen die beiden ersten den „rauhen, wie von „Stößen“ begleiteten, um eine Octave tieferen Querton hören (pag. 154, *d*), Nr. 3 aber nicht.

Ferner liefert König zwei Messingstäbe, bei welchen der erste harmonische Längenton um eine Octave höher ist, als der Querton mit n und beziehungsweise $(n + 1)$ Knotenlinien. Im Übrigen verhält sich Alles wie vorhin (p. 155, *e*). Die letzten Stäbe werden um $^1/_4$ ihrer Länge von den Korkstegen gestützt und der Länge nach erregt. Die Knotenlinien für den Längenton liegen über den Stützpuncten; nur hier dürfen also die Stäbe gehalten werden.

Sobald der Längenton auftritt, lässt man den Stab frei, weil sonst kein Transversalton erschiene, indem die Knotenlinien des Transversaltones andere sind, als jene des harmonischen Longitudinaltones.

König, akust. Catalog 1865, pag. 31

13. Terquem über Torsionsschwingungen. Berl. Ber. für 1859, XV. pag. 158 bis 163.

14. Lissajous bestätigt Terquems Studien in Compt. rend. XLVI. pag. 846 bis 848. — Berl. Ber. für 1858, XIV. pag. 153 bis 154.

15. Das Polarisations-Vibroskop, nach Dr. August Kundt.

a) *Geschichtliches.* Biot brachte im Jahre 1820 einen nahezu zwei Meter langen Spiegelglasstreifen zwischen die zwei gekreuzten Spiegel eines Polarisations-Apparates. Wenn derselbe in longitudinale Schwingungen versetzt wurde, zeigte sich sein Bild, so lange er klang, im analysierenden Spiegel hellglänzend. Biot war der Ansicht, dass durch das Tönen, also durch die entsprechenden Verdichtungen und Verdünnungen eine gewisse Spannung im Stabe hervorgerufen werde, welche

wie ein Druck oder eine Temperaturänderung die „Doppelbrechung“ im tönenden Stabe bewirke.

1. Der Glasstreifen konnte leicht erregt werden und gab schöne Klänge; seiner hatte sich früher Savart bedient.

2. Biot in Ann. de Chimie, 1820, XIII. pag. 151—155 aus „Bull. d. Sc.“; ferner darüber Dove, Pogg. Ann. 1835, XXXV, pag. 595.

3. Über Polarisation des Lichtes siehe Marbach's physikal. Lexicon, 2. Aufl. pag. 393 bis 458.

4. Über die Doppelbrechung des Lichtes in tönenden Stäben von Dr. August Kundt in Pogg. Ann. 1864, CXXIII. pag. 541 bis 558.

5. König, Katalog für Akustik; Paris 1864, pag. 47, Nr. 218.

b) Grundgedanke zum Polarisations-Vibroskop. Dr. August Kundt in Berlin nahm in jüngster Zeit (1864) diesen höchst interessanten Gegenstand wieder auf. Er ging von dem Gedanken aus, das Aufleuchten des longitudinal schwingenden Stabes dürfte bloss an den Örtern der Knoten, d. i. wo die größte Verdichtung oder Verdünnung statt hat, erfolgen. Die Lichterscheinung wäre dann eigentlich eine von dunkeln Stellen regelmäßig unterbrochene, welche nur wegen des raschen Wechsels von Licht und Finsternis für ein continuierliches Hellsein gehalten würde. (§. 90, pag. 177). Um darüber in's Klare zu kommen, musste eine Auflösung der Lichterscheinung bezüglich der Zeitelemente mit Hilfe eines rasch rotierenden Planspiegels in zweckmäßiger Weise eingeleitet werden (vergleiche §. 90 pag. 177 und §. 97 pag. 199). Und als eine derartige Licht-Analyse wirklich hergestellt wurde, fand Dr. Kundt sein Raisonnement vollkommen bestätigt. In den Knotenpuncten gab sich die stärkste Lichterscheinung kund; genau in der Mitte zwischen zwei Knoten und an seinen beiden Enden blieb der Stab dunkel.

Die Dunkelheit an den Enden des Stabes hatte auch schon Biot bemerkt, aber nicht die in der Mitte zwischen je zwei Knoten liegenden, schwarz bleibenden Streifen. Er meinte ganz einfach, die oben erwähnte (vergl. *a*) Spannung erstrecke sich nicht bis an die Enden des Stabes, und daher hier die Finsternis.

c) Beste Lage des Glasstreifens gegen die Polarisationsebene. Sendet man geradlinig polarisiertes Licht senkrecht zur Längenaxe oder senkreht zu den Seiten des

Glasstreifen, so verhalten sich seine Theilchen während der longitudinalen Vibrationen wie Krystallplättchen, welche mit ihren Axen in derselben Richtung wie die Länge des Stabes liegen und die parallel zu ihrer Axe geschliffen sind. Für einen solchen Fall erscheinen die Krystallplättchen bei gekreuzten Polarisationsebenen des Polarisators und Analysators dunkel; werden hingegen am hellsten, wenn ihre Axen 45° im Azimuth zu der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes geneigt sind. Daraus folgt: Wenn die Ebene der Polarisation des durch den longitudinal tönenden Glasstreifen gesendeten Lichtes mit der Längenrichtung des Stabes parallel geht oder einen rechten Winkel macht, so wird der tönende Glasstreifen bei gekreuzten Polarisationsebenen dunkel bleiben, er wird hingegen am hellsten werden, wenn die Längenrichtung des Glasstreifens und die Polarisationsebene einen Winkel von 45 Graden mit einander bilden. Bei horizontaler Lage des tönenden Glasstabes muss also die Polarisationsebene des Lichtes 45° im Azimuth mit der Längenaxe des Glasstreifens liegen.

1. Die Elasticitätsflächen für die Compressions- und Dilatationsstellen an longitudinal tönenden Stäben. *a*) Wenn der Stab longitudinal tönt, so ist die Axe der Elasticität für einen Compressionspunct in der Richtung der Verdichtung, d. i. in der Richtung der Längenaxe des Glasstreifens gewachsen. In allen dazu senkrechten Richtungen ist zwar die Dichte von jener in der Längenrichtung verschieden, aber jedenfalls erfolgt eine Dichtenänderung in der zur Längenrichtung senkrechten Ebene und diese ist wegen der gleichförmigen Dichte des Glases gleichmäßig. Die Elasticitätsfläche für die Puncte der Compression ist daher ein Ellipsoid, dessen größere Axe mit der Längenrichtung des Stabes zusammenfällt.

b) Für die Örter der Dichtenverminderung ist aus ähnlichen Gründen die Fläche der Elasticität ein Ellipsoid, dessen kleinere Axe mit der Längenrichtung des Streifens einerlei ist.

c) Während des longitudinalen Tönens geht also die Fläche der Elasticität fortwährend vom verlängerten Ellipsoid zum abgeplatteten über und umgekehrt, wobei sie nothwendiger Weise die Kugelform passieren muss. Die Abweichung dieser Elasticitätsaxen von dem Durchmesser der Übergangskugel hängt von dem Werthe der größten Compression oder der größten Dilatation an dem entsprechenden Orte ab. Jedenfalls ist aber daraus klar, dass sich die Theilchen eines longitudinal tönenden Stabes als doppelbrechende Krystallplätt-

chen ansehen lassen und dass die oben gemachten Folgerungen bezüglich der besten Lage des Stabes richtig sind.

2. Biot hielt seinen Glasstreifen während der longitudinalen Vibration in der Hand; er bekam also sehr wechselnde Lagen, welche eben zum Verdecken des wahren vom Dr. Kundt anfgefundenen Verhaltens beitragen mochten.

d) Die Newton'schen Farben müssten sich auch hier im rotierenden Spiegel zeigen. Vom Centrum des dunkeln Streifens bis zur Mitte des benachbarten hellen sollte jene Farbenreihe auftreten, wie sie am Newton'schen Farbenglas vom dunkeln Mittelpuncte aus erscheint, wir sagen „sollte" — die Lichtschwäche, ferner das Zusammenfließen der Farben (§. 90) bei der schnellen Rotation des bildauflösenden Spiegels ließen nur im Allgemeinen Farben erkennen und dies nicht immer.

Das Kreuz einer Kalkspathplatte und die Farbe eines Gypsblättchens, welche zwischen dem tönenden Glasstreifen und dem Analysator des Polarisations-Instrumentes lagen, verwischten sich oder verschwanden gänzlich, je nach der Stärke des Tones. Die Ursache liegt in dem Wechsel der Art und des Zeichens des polarisierten Lichtes, welches den longitudinal tönenden Stab verlässt.

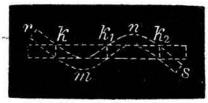
e) Ungeänderte Lichterscheinung. Polarisiertes Licht, welches durch zwei hintereinander gestellte Glaswürfel dringt, von denen der eine eben so stark verdichtet als der andere in gleicher Richtung verdünnt ist, bleibt ungeändert. So muss es sich auch verhalten, wenn polarisiertes Licht, welches durch einen Punct der größten Verdichtung des longitudinal tönenden Stabes gegangen ist und sodann durch eine Stelle der größten Verdünnung im benachbarten Knoten zurückgesendet wird. Auch diese Folgerung fand Dr. Kundt bestätigt.

Der betreffende Versuch wurde von Dr. Kundt so genau als möglich durchgeführt.

f) Doppelte Brechung an transversal vibrierenden Glasstäben. Dr. Kundt untersuchte auch die Glasstäbe, wenn sie transversal tönten. Es zeigten sich dann die Knotenpuncte ganz dunkel und die Mitte zwischen zwei der letzteren am hellsten, also das directe Gegentheil von der Erscheinung an longitudinal vibrierenden Glasstäben. Überdies lief hier durch die Mitte der Breite am Glasstreifen parallel zur Längenkante

ein schwarzer Streif, der an den beiden Enden sich über die ganze Breite des Glasstückes erstreckte. Der Stab hatte in einem Momente betrachtet, die in Fig. 96 dargestellte Form.

Fig. 96.



Die Berge und Thäler mussten senkrecht von den Lichtstrahlen durchschnitten werden und die Polarisationsebene einen halben Rechten mit der Horizontalebene bilden (vergl. *c*), wenn die doppelte Brechung des transversal tönenten Glasstabes am deutlichsten hervortreten sollte.

g) *Die Erklärung der Lichterscheinungen an transversal tönenden Stäben.* Brewster und Neumann haben auf dem Wege der Theorie und Erfahrung dargethan, dass ein an beiden Enden aufliegender, in der Mitte durch mechanische Kräfte (Druck, Zug, Gewichte) gebogener Glasstreifen parallel zur Längenaxe einen dunkeln Streif haben müsse, welcher sich an den Enden über die Breite des Streifens ausdehnt. Eine ähnliche Erscheinung bietet ein Stab, der nur an einem Ende befestigt, am anderen freien Ende aber gebogen ist. Die finstere Längenaxe erweitert sich dann am freien Ende langsam, am fixierten schnell. Es springt nun von selbst in die Augen, dass ein transversal tönender Stab die beiden hier erwähnten Fälle in sich fasst. Und in der That treten die Erscheinungen so auf, wie sie vorausgesagt werden konnten. Bei der rein mechanischen Biegung erscheinen aber oberhalb und unterhalb des Schwarzstreifens noch die Newton'schen Farbenreihen, die hier wegen der Lichtschwäche und des taumatropischen Princips halber nicht wahrgenommen werden (vergl. *d*). — Nach einer halben Schwingungsdauer werden Berg und Thal die entgegengesetzte Lage von der in Fig. 96 dargestellten Auffassung haben. Wie von selbst einleuchtet, ändert aber dies an der Erscheinung nichts. Beim Übergang aus der einen Lage in die zweite wird der Stab die Ruhelage und die Zwischenphasen passieren müssen; mithin einmal gar keine Doppelbrechung und dann verschiedene Grade derselben bis zu dem vorhin auseinander gesetzten Maximum bieten. Wegen Kleinheit der Schwingungen im Vergleich mit der Grösse des Stabes und

wegen des taumatropischen Principes (vergl. *d*) gibt sich jedoch die Lichterscheinung beim Tönen nicht einmal intermittierend, bis der auflösende Rotationsspiegel auch hier das Nichtconstante aufdeckt.

1. Der dunkle Längenstreif ist eigentlich die neutrale Zone, wo die Verdichtung der hohlen und die Verdünnung der erhabenen Seite des gebogenen Stabes aneinander grenzen.

2. Das Verwischen der Farben an eingeschalteten Krystallplättchen (vergl. d, Note) und das Finsterbleiben des tönenden Stabes, wenn das Licht aus einer compressierten Stelle kommend, durch eine dilatierte gesendet wird, findet auch bei transversal vibrierenden Stäben statt.

h) Dr. Kundt's Apparat bezüglich des doppelbrechenden Lichtes in tönenden Glasstäben. 1. Es sollte ein größeres Stück des tönenden Stabes auf einmal beobachtet werden, es war daher viel polarisiertes Licht nothwendig. Zu diesem Behufe wurde das Licht eines großen, Argand'schen Gasbrenners der gleichförmigen Helligkeit halber durch einen geölten Seidenpapierschirm auf einen (mehr als 1□′) großen schwarzen Glasspiegel geleitet. Das hier nahezu vollständig polarisierte Licht wurde in senkrechter Richtung durch den wagrecht liegenden Glasstreifen geführt und von da in ein (6—8′) entferntes Nicol'sches Prisma. Die Glasstäbe durften natürlich nur in einem oder zwei ihrer Knotenpuncte gestützt werden.

2. Die longitudinale Erregung geschah, indem eine Stelle, wo kein Knoten zu erwarten war, der Länge nach mit einem nassen Tuch gerieben wurde. Bei der transversalen Erregung hing der Glasstab an einer Leiste. Die tragenden Fäden waren um die Knotenpuncte geschlungen. Der Glasstreifen wurde mit einem Haarbogen an einem Nichtknoten scheitelrecht gestrichen und während dem an einem der Knotenpuncte mit den Fingern gehalten.

3. Um zu zeigen, das beim Tönen auftretende Licht sei nur intermittierend, verwendete Dr. Kundt einen Dove'schen Polarisationsapparat. Der tönende Glasstab lag hier wagrecht zwischen den beiden Nicol'schen Prismen. Das aus dem analysierenden Nicol kommende Licht wurde mit Hilfe eines rechtwinkligen Glasprismas seitwärts auf einen rotierenden Spiegel

geworfen. Zuweilen wurde noch, um eine scharfe Lichtlinie zu erhalten, ein Spalten-Diaphragma zwischen den vorderen Nicol und Spiegel geschoben.

1. Der rotierende Spiegel wurde von einem Triebwerk mäßig schnell bewegt und war aus versilbertem Glase oder Stahl; letzterer von 20mm Durchmesser; ersterer viel größer.

2. Je rascher man den Spiegel dreht, desto weiter liegen die Lichtstreifen auseinander (vergl. pag. 197).

3. Bei gleicher Umlaufsgeschwindigkeit des Spiegels liegen die Lichtstreifen an longitudinal vibrierenden Stäben enger an einander, weil ihre Töne höher sind.

4. Bei bekannter Umlaufsgeschwindigkeit des Spiegels könnte man durch Zählen der zwischen zwei Fäden eines Fernrohres liegenden Streifen sogar die Schwingungszahl des entsprechenden Tones bestimmen, wenn auch minder genau als durch andere Methoden.

5. Über Dove's Polarisations-Apparat siehe Marbach physikal. Lexicon, 2. Aufl., pag. 401, ferner Pogg. Ann. 1835, XXXV. pag. 596.

i) Rückblick. Das Wesen eines Kundt'schen Polarisations-Mikroskopes besteht demnach aus einem größeren Polarisations-Instrument, welches gestattet, längere Glasstäbe zwischen den Polarisator und Analysator in wagrechter Lage einzuschalten, das polarisierte Licht senkrecht zum tönenden Stab (seitwärts, an der Kante) durchzuführen und dasselbe, nachdem es den Analiseur passiert hat, mittelst eines rotierenden Spiegels in seine Zeitelemente aufzulösen (vergl. pg. 197). Longitudinal tönende Stäbe zeigen dann in den Knoten die hellsten Stellen; transversal vibrierende Stellen verhalten sich entgegengesetzt und besitzen überdies einen finstern Längenstreif (vgl. *c*). König in Paris liefert bereits Polarisations-Vibroskope.

Citate zu VII.

Tönende Platten.

1. Chladni Klangfiguren in „Entdeckungen über die Theorie des Klanges 1787".

2. J. Bernouilli analystische Erklärung der Klangfiguren in Nov. A. Ac. Petrop. Anno 1787, Band V, pag. 197. — Eine Abhandlung allgemeinern Inhaltes über Klangfiguren hat auch Dan. Bernouilli geschrieben. Comm. Pet. Band XII. pag. 105 und 165.

3. Euler Knotenlinien an Stäben und Streifen in Acta Ac. Pet. 1779, Band III, pag. 103.

Mehr genügende Resultate:

G. Riccati: Mem. di Mat. e Fis. della Soc. Ital. Band I, pag. 444. Poisson: Mem. de l'Acad. Instit. de France. Band VIII, pag. 442. Ein reicher Literatur-Nachweis in Bindseils Akustik 1839, Artikel „Stäbe" pag. 141 bis 232.

4. Dem. Sophie Germain erhielt 1816 von der französischen Akademie einen Preis für eine einschlagende Abhandlung, welche zwar die schon 1808 gestellte und seitdem wiederholte Frage, bezüglich einer analystischen Theorie der Klangfiguren nicht löste, worin sich aber einige neuere, mathematisch richtige Resultate befanden. Näheres über die Geschichte der Klangfiguren und der gesuchten Theorie in Chladni, neue Beiträge zur Akustik., Leipzig 1817, pag. VIII.

5. Poisson in Mem. de L'Institut 1829, Band VIII, pag. 523. — Cauchy über dasselbe Thema Exercices de Mathem. III et IV.

6. Dr. Young in seinem „A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts 1807 bei Besprechung der Chladnischen Figuren.

7. Wheatstone über Chladni's Klangfiguren auf quadratischen Scheiben in Philosoph. Transact. für 1833, pag. 593 bis 609 und Tafeln mit den abgebildeten Klangfiguren und Constructionsfiguren, pag. 611 bis 633. Wheatstone beginnt damit, dass er auf quadratischen Scheiben die 90 Klangfiguren, welche Chladni (1817) in seinen neuen Beiträgen zur Akustik veröffentlichte, vor das Auge des Lesers bringt und diesen mit der Terminologie und jener Tafel bekannt macht, welche das wesentlichste bezüglich jener Klangfiguren übersichtlich zusammenfasst. Hierauf reproduciert (§. 2, pag. 596), er die Euler'schen durch die Erfahrung bestätigten Gesetze der Knotenlinien an einem Stabe oder einem Streifen, welcher an beiden Enden frei ist, und leitet daran den Begriff der positiven und negativen Schwingungen ab.

In §. 3 (pag. 597) wird die Zusammensetzung primärer Schwingungen gegeben. — §. 4 (pag. 598) Zusammensetzung schiefer Knotenlinien und Grenze dieser Zusammensetzung. — §. 5 (pag. 599 bis 602) Vierfache Zusammensetzung und Ergebnisse. — §. 6, 7 und 8 (pag. 602 bis 605) Vergleichung der Theorie mit der Erfahrung. — §. 9 (pag. 605 und 606) Wheatstone's Tabelle zur Übersicht. — §. 10 (pag. 607). Geschichte der Theorie zu Chladni's Figuren. — §. 11 (pag. 608 und 609) Klangfiguren auf Holzplatten. —

Whewell Geschichte der inductiven Wissenschaften. 1840, II. pag. 352.

König liefert 6 rechteckige Klangplatten aus Messing von der im §. 87 besprochenen Eigenschaft und 3 hölzerne Klangplatten, von welchen eine rechteckig und 2 quadratisch sind.

Bei einer der beiden letzteren laufen die Fibern parallel zur Diagonale. An ihr bilden 2 parallel zu der einen Seite laufende Knotenlinien mit den Axen der Elasticität den gleichen Winkel wie zwei Knotenlinien, welche parallel mit der zweiten Seite sind. Die beiden entsprechenden Töne sind im Einklang und die entstehende Figur sind zwei sich kreuzende Diagonalen. Die Beschaffenheit der beiden anderen Holzplatten hinsichtlich der Knotenlinien ist aus §. 87 bekannt.

Die coëxistierenden Schwingungen der Metallklangplatten unterscheiden sich von jenen an den Terquem'schen Stäben (§. 74) dadurch, dass in letzteren die eine Art der Schwingungen longitudinal ist, während sie an den Platten stets transversal sind. Wenn bei den quadratischen Scheiben die resultierenden Knotenlinien krummlinig sind, so entsprechen sie vier primären Tönen und einer vierfachen Zusammensetzung von primären Knotenlinien, welche so liegen, wie dies in §. 79 angegeben wurde. Bei rechteckigen Klangplatten aus Metall oder Glas entsprechen schon zwei coëxistierenden Tönen krummlinige Klangfiguren (Fig. 83, pag. 167).

8. Philosoph. Transact. 1833. (pag. 619—633).

9. Über Klangfiguren auf Quadratscheiben. Chladni Akustik 1802. (Französische Übersetzung 1809.) Neue Beiträge zur Akustik 1817. Literatur: Bindseil Akustik in den Noten, pag. 284 bis pag. 389.

10. Strehlke über Klangfiguren in Pogg. Ann. Bd. IV (LXXX. ganze Reihe) pag. 205.

Pogg. Ann. Bnd. XVIII (XCIV. g. R.) pag. 198. Band XXVII (CIII. ganze Reihe) pag. 537. — Fechner Repert I. pag. 291.

11. Wheatstone Philos. Transact. 1833, pag. 695.

12. Bindseil Akustik pag. 166.

13. Lissajous Ann. chim. 3. série. T. XXX.

14. Savart. Pogg. Ann. Bd. XVI (XCII. der ganzen Reihe), p. 206. Bindseil Akustik, pag. 351 bis 361 sammt Literatur.

15. Weber. Wellenlehre 1825, pag. 474; allgemeine musik. Zeit. 1826 und Pogg. Ann. 1830 XIX, 309 bis 311. — Whewell Geschichte der inductiven Wissenschaften 1840, II, pag. 352. Bindseil Akustik pag. 267, Anmerkung, in welcher sich der literarische Nachweis findet.

16. König zur „Theorie der Klangfiguren." Pogg. Ann. 1864, CXXII, pag. 238 bis 242. — Cosmos 1864, Vol. XXIV, pag. 391. — König, akustischer Catalog 1865, pag. 32, Nr. 189.

Citate zu VIII.

Pfeifen.

1. Cavaillé-Coll in Compt. Rend. 1860, L. pag. 176 bis 180. — Inst. 1860, pag. 40 bis 41. — Cosmos 1860, XVI, pag. 95 bis 97. — Berl. Ber. für 1860, XVI. pag. 157 u. 158. Auch für Pfeifen, welche behufs einer Änderung des Klanges, aus zwei Röhren von derselben Axe, aber von verschiedenem Durchmesser angefertigt werden, gelten die von Cavaillé-Coll aufgestellten Regeln; siehe darüber „Des tuyaux dits à cheminée" par Gripon in Les Mondes, 1865, VII. pag. 428 bis 429; ferner über derartige Pfeifen Les Mondes, VII. pag. 88.

König liefert Pfeifen zur Illustration des Gesetzes von Cavaille-Coll (§. 88, pag. 170) und zwar:

a) Fünf Pfeifen von gleicher Tiefe und verschiedener Länge; ihre Tonhöhen: c^{-1}, d^{-1}, e^{-1}, f^{-1} und g^{-1}.

b) Vier Pfeifen von verschiedener Tiefe und gleicher Länge für die Töne: d^{-1}, e^{-1}, f^{-1} und g^{-1}.

c) Eine cubische Pfeife mit Glasscheiben und 3 Stöpseln zum Ändern der Dimensionen. Geschieht dies bezüglich der Länge oder Tiefe, so ergibt sich stets dasselbe Resultat und man kann successive alle Töne einer Octave erhalten. Wird die Breite des Rohres und gleichzeitig jene des Mundes vermindert, so lässt sich die Tonhöhe etwa nur um einen halben Ton steigern.

2. G. Wertheim in Compt. Rend. 1860, L., pag. 308 bis 311. — Inst. 1860, pag. 57 bis 58. — Berl. Ber. für 1860, XVI, pag. 159.

3. Zu finden in jedem größeren Lehrbuch der Physik und Chemie. — Physikalische Lexica (Gehler, Marbach), Artikel: Chemische Harmonica. — Bindseil Akustik pag. 594. — Chladni Akustik pag. 91 u. s. f.

4. F. H. Schaffgotsch in Pogg. Ann. 1857 C, pag. 352. — Zeitschrift für Mathematik und Physik von O. Schlömilch und Cantor (gekürzt Schlömilch Zeitschr.) 1857, 1. Abth. pag. 350.

Z. S. für Naturw. IX. pag. 467. — Berl. Ber. für 1857, XIII. pag. 176. Wiener acad. Ber. XXIV. pag 3 bis 4. — Daguin Physique 2. Edit. I pag. 630.

Marbach, physikalisches Lexicon, 2. Auflage, VI., 1859, pag. 420.

5. Pogg. Ann. 1857, C pag. 352, Anmerk.

6. Tyndall. On the sounds produced by the conduction of gases in tubes, Originalaufsatz in The London, Edinburgh and Dublin, philosophical Magazine and Journal of science (gekürzt: Philos. Mag.) 4. Reihe XIII. pag. 473 bis 479. — Ann. d. chim. 3. Reihe, LI, pag. 500 bis 501. — Arch. phys. XXXV. pag. 178 bis 187.

Cosmos 1858, XIII. pag. 62 bis 63. — Inst. 1857, pag. 350 bis 352. Journal de pharmacie et de chimie (Journ. pharm.) XXXIII. pag. 64 bis 65. — Cimento VI. pag. 353 bis 362. — Berl. Ber. für 1857, XIII. pag. 176 bis 179. — Daguin Physique, 2. Edit. I. pag. 630.

7. Chladni Akustik 1809, pag. 91 u. s. f.

8. F. G. Schaffgotsch in den Monatsberichten der kön. preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin (Berl. akad. Ber.) 1857, pag. 248 bis 252. — Philosoph. Mag. 4. Reihe, XIV. pag. 541 bis 544. — Inst. 1858, pag. 38 bis 40. — Am ausführlichsten Pogg. Ann. 1857, CI. pag. 471—487 — Berl. Ber. für 1857, XIII. pag. 183 bis 186.

9. Le Conte in the american Journal of science and arts, by B. Silliman (Silliman Journ.), 2, Reihe XXV. pag. 62 bis 67. — Philos. Mag. 4. Reihe XV. pag. 235 bis 239. — Inst. 1858, pag. 115 bis 116. — Arch. phys. 2. R. I. pag. 270 bis 273. — Berl. Ber. für 1858, XIV. pag. 143 bis 144.

10. Silliman Journ. 2. R. XXXI. pag. 416 bis 417. Berl. Ber. für 1861, XVII. pag. 168.

11. A. Arndtsen. Pogg. Ann. 1858, CIV· pag. 496; Berl. Ber. für 1858; XIV. pag. 174.

12. Von der Täuschung durch Irradiation wird hier als einem nur aus methodischen Rücksichten gewählten Beispiel abgesehen. Bei den schwächer leuchtenden Flammen ist der Einfluss der Irradiation nicht zu fürchten.

13. Wheatstone in Philos. Transact. für 1834 in der Abhandlung über die Geschwindigkeit der Reibungselektricität pag. 583 bis 591.

14. Siehe die Schriften unter 6, besonders die erste. — Daguin Physique. 2. Edit. I. pag. 457.

15. F. G. Schaffgotsch in Pogg. Ann. 1857, CI. pag. 476; ferner pag. 485. — Berl. Ber. für 1857, XIII. pag. 186.

16. Grailich und Weiss in den Wiener acad. Ber. XXIX. pag. 273. Berl. Ber. für 1858, XIV. pag. 166 und 167.

17. und 18. Rogers in seiner Arbeit „some experiments on sonorous flames, with remarks on the primary source of their vibration. Silliman Journ. 2. Serie, XXVI. pag. 1 bis 15. — Arch. phys. 2. Reihe, IV. 75 bis 80. — The Edinburgh new philosophical Journal (Edinb. Journ.) 2. Reihe, VIII. pag. 300 bis 312. — Berl. Ber. für 1858; XIV. pag. 148 und 149.

19. und 20. Optische Analyse eines ausfließenden Wasserstrahles in Ann. de chim. 2. série, LIII. pag. 337. — Daguin Physique, 2. Edit. I. pag. 243 bis 244. — Jamin Physique, I. pag. 331 bis 335.

21. und 22. Fixierung des Ausflussstrahles im optischen Sinne; siehe Daguin Physique, 2. Edit. IV. pag. 325. (Der Bogen 21 dieses Werkes ist falsch paginiert; es soll z. B. stehen 325 statt 225. Dieses Versehen hat sich auch in den Index verpflanzt; z. B. beim Taumatrop.)

23. C. Montigny im „Bulletin des séances de la Classes des sciences“ de l'Académie Royal, Bruxelles 1859, pag. 99 bis 111; ferner in den Bulletins de l'Académie Royal des sciences, des lettres. Bruxelles 1859, 2. Reihe, VI. pag. 159 bis 171. — Inst. 1859, pag. 194 bis 196. — Cosmos 1859, XV. pag. 290 bis 291. — Berl. Ber. für 1859, XV. pag. 166.

24. Schaffgotsch; siehe Pogg. Ann. 1857, CII. pag. 627 bis 629 mit einer Abbildung des Tonflammen-Apparates. — König Catalog für Akustik 1865, pag. 27. Nr. 166.

25. Geschichte der chem. Harmonika; siehe Gehlers neu bearbeitetes physikalisches Lexikon V, 1. Abtheilung, pag. 97 bis 105 „Chemische Harmonika“ von Munke. Eine treffliche Abhandlung mit einschlagender Literatur. Marbach, physikalisches Lexikon, 2. Auflage, III. pag. 689 bis 695, Artikel „Harmonika“ v. H. Emsmann. Eine sehr gute Arbeit mit Angabe der Quellen.

26. Higgins, siehe Nicolson Journ. of Nat. Phil. New Ser. I. pag. 129; IV. pag. 33. — Ann. de chim. VIII. pag. 363.

27. De Luc in seinen neuen Ideen über Meteorologie, I. pag. 138, §. 200.

28. Hermbstädt in Crell's chem. Ann. 1793, I. pag. 355.

29. Mussin Puschkin, siehe Taschenbuch für Scheidekünstler von Göttling, 1795, pag. 18.

30. Scherer, siehe Gren's Journ. VIII. pag. 375. — Gren's N. Journ. II. pag. 506.

31. Chladni; siehe Hindenburg, Archiv der reinen und angew. Mathem. 1794, I. pag. 126. — Neue Schriften der Gesellschaft d. Nat. Fr. Berlin 1795, I. pag. 125. — Die Akustik von Chladni, Leipzig 1802, pag. 91 bis 93; pag. 307.

32. De la Rive; siehe Journ. de Phys. LV. pag. 165.

33. Faraday; Ann. d. chim. VIII. pag. 363.

34. Martens; siehe Daguin Physique. 2. Ed. I. pag. 456.

35. Davy; siehe Daguin Physique, 2e Ed; I. pag, 457.

36. Zennek; siehe Schweigger's Journ. XIV. pag. 14.

37. und 38. Brugeatelli und Pictet; siehe Gehler, neu bearb. V. 2. Abth. pag. 101 und pag. 102.

39. Geiger; siehe Handbuch der Pharmacie, 2. Aufl. 1827. I. pag. 244.

40. Böttger; siehe Pogg. Ann. 1855. XCIV. pag. 572. — Chem. pharm. Centralbl. 1855, pag. 416. — Neues Jahrb für Pharmac. IV. pag. 154. — Berl. Ber. für 1855 XI, pag. 216.

41. De la Rive; siehe Journal de Physique, LV. pag. 173. — Daguin Physique, 2e Edit. pag. 457.

42. August Pinaud in Pogg. Ann. 1837, XLII. pag. 610 bis 618. — L'Institut Nr. 131, pag. 366. — Dove Repertor 1839. III, pag. 100.

43. C. Marx in Erdmann, Journal für prakt. Chemie, 1841, XXII. pag. 129 bis 135. Marbach phys. Lexik. 2. Aufl. III. pag. 691 und 693.

44. G. Sondhaus in Pogg. Ann. 1850, LXXIX. pag. 1 bis 34. Marbach phys. Lexik. 2. Aufl. III. pag. 692 und 693.

45. Emsmann; siehe Pogg. Ann. 1840, LI. pag. 444. — Marbach, physik. Lexik. 2. Aufl. III. pag. 691, Anmerk.; ferner II. pag. 46. — Emsmann hat sich schon 1831 mit diesem Gegenstande beschäftigt.

46. Siehe die Werke unter 42, 43 und 44. — Marbach, phys. Lexik. 2. Aufl. III. pag. 694.

47. Schrötter in Wien. acad. Ber. 1857, XXIV. pag. 18 bis 22. — Ann. d. chim. 3. R. LIII. pag. 240 bis 241. — Berl. Ber. für 1857; XIII. pag. 180.

48. Sondhaus in Pogg. Ann. 1860, CIX. pag. 445.

49. Grailich und Weiß in Wien. acad. Ber. 1858, XXIX. p. 271 bis 280. — Z. S. f. Naturw. XII. pag. 247 bis 249. — Berl. Ber. für 1858. XIV. pag. 166 bis 168.

50. W. B. Rogers in Phil. Mag. 4. R. 1858, XV. pag. 261 bis 263; ferner pag. 404 bis 405. — Arch. phys. 2. R. II. pag. 57 bis 58; ferner IV. 75 bis 80. — Ausführlich in Silliman Journ. 2. R. XXVI. pag. 1 bis 15. — Edinb. Journ. 2. R. VIII. pag. 300 bis 312. — Berl. Ber. für 1858, XIV. pag. 144 bis 150.

51. Schaw; siehe Berl. Ber. für 1858, XIV. pag. 146.

52. Peterim und Weiß in Wien. acad. Ber. 1858, XXXII. pag. 68 bis 75. — L'Instit. 1858, pag. 330 bis 331. — Berl. Ber. für 1858. XIV. pag. 168 bis 170.

53. H. Reinisch im neuen Jahrb. für Pharmacie, XV. pag. 28. — Berl. Ber. für 1861 XVII, pag. 169.

54. Dr. Sondhaus in Pogg. Ann. 1860, CIX. pag. 1 bis 43; Fortsetzung pag. 426 bis 469. (Mitgetheilt von Director Sondhaus aus dem Programm der Realschule zu Neiße.) — Zeitschrift für Naturw. XV. pag. 50 bis 52; Fortsetz. pag. 336 bis 338. — Berl. Ber. für 1860 XVI. pag. 123 bis 132.

55. P. L. Rijke in Pogg. Ann. 1859, CVII, pag. 339 bis 343. — Z. S. f. Naturw. XIII, 457 bis 458. — Berl. Ber. für 1859, XV, pag. 165. Cosmos 1859, XIV, pag. 508 bis 511. — Philosoph. Mag. 4 R. XVII, pag. 419 bis 422. — Arch. phys. 2 R. V. pag. 361 bis 362.

56. Bosscha, siehe Pogg. Ann. 1859, CVII, pag. 342 gegen Ende und 343.

57. P. Riess. Das Anblasen offener Röhren durch eine Flamme in Pogg. Ann. 1859 CVIII, pag. 653 bis 656. — Z. S. f. Naturw. XIV. 371. — Berl. Ber. für 1859, XV. pag. 165.

58. P. Riess. Anhaltendes Tönen einer Röhre durch eine Flamme in Pogg. Ann. 1860 CIX, pag. 145 bis 147. — Z. S. f. Naturw. XV. p. 50. Berl. Ber. für 1860 XVI, pag. 132.

59. König's Röhre zum Nachweise der Bäuche und Knoten. — Cosmos 1862, XXI, pag. 147 bis 149. — Cimento 1862, XII, pag. 5. — Pisko, VIII. Jahresber. der Wiedner Oberrealschule, Wien 1863, pag. 32.

Berl. Ber. für 1862, XVIII. pag. 138. — Pogg. Ann. für 1864. CXXII, pag. 243. — Les Mondes 1865, VII, pag. 646 und König, illustrierter Catalog akustischer Instrumente, Paris 1865, pag. 43, Nr. 213 und 214.

60. König Interferenz der Schallwellen in Pfeifen nachgewiesen mittelst Flammen; siehe Pogg. Ann. 1864, CXXII, pag. 244. — Cosmos 1864, XXIV, pag. 440. — Les Mondes 1865, VII, pag. 647 und König illustrierter Catalog akustischer Instrumente, Paris 1865, pag. 43, Nr. 215.

61. König's Apparat bestimmt, um auf sichtbare Art den Klang zu zerlegen in seine Partialtöne, mittelst einer manometrischen Flamme; siehe Les Mondes par Moigno 1865, T. VII, pag. 648 sammt Zeichnung. Dasselbe im illustrierten akustischen Katalog von König, Paris 1865, pag. 43, Nr. 216.

Citate zu IX.

Fortpflanzung des Schalles.

A. Ermittlung der Schallgeschwindigkeit auf kurze Strecken.

1. Über die älteren Versuche bezüglich der Schallgeschwindigkeit. Marbach, physikal. Lexicon, 2. Aufl. V. pag. 700, woselbst auch die einschlagende Literatur verzeichnet ist.

2. J. Bosscha in Pogg. Ann. 1854, XCII, pag. 491 bis 492.

3. R. König in Pogg. Ann. 1863, CXVIII, pag. 610 bis 614. — Compt. Rend. 1862 LV. pag. 603 bis 605. — Cosmos 1862, XXI, pag. 377, pag. 426 bis 427. — L. Institut 1862, pag. 333.

4. Bosscha in Pogg. Ann. 1854, XCII, pag. 486 und 489 bis 490; ferner Prof. Kaiser in den Schriften der kön. niederl. wissenschaftlichen Akademie, I. Classe, V, pag. 9.

5. Allgemeene Konst en Letterbode 1853, Nr. 51; ferner in Dr. J. Bosscha in Pogg. Ann. 1854, XCII, pag. 485 bis 494. — Berl. Ber. für 1853 IX, pag. 163 bis 166, mit einer Begründung vom Herrn Prof. Röber. — Ferner Bosscha bei Gelegenheit der Reclamation seines Prioritätrechtes gegen Faye, Cosmos XXI, 1862, pag. 533 bis 537. — Berl. Ber. für 1862, XVIII, pag. 129 bis 132.

6. Dr. Kahl in der Zeitschr. für Mathem. v. Dr. Schlömilch etc., 1864, IX, pag. 69.

7. Siehe Note 5.

8. Prof. „Rb." in Berl. Ber. für 1862, XVIII, pag. 129 bis 132.

9. Dr. Kahl in Zeitschrift für Mathem. von Dr. Schlömilch etc. 1864, pag. 65 bis 69.

10. Faye in Compt. Rend. 1862 LV, pag. 521 bis 523, pag. 603 bis 605. — Cosmos 1862, XXI, 375 bis 377; pag. 426 bis 427. — L. Instit. 1862, pag. 317 bis 318 und pag. 333.

B. Die Brechung des Schalles.

1. Chr. Doppler. Die Brechung des Schalles mittelst totaler Reflexion nachgewiesen in Wien, akad. Bericht, mathem. Classe, 1849 1. Abthl., pag. 322 bis 329. — Marbach physik. Lexicon, 2. Aufl. VI. pag. 925.

2. C. Sondhaus. Über die Refraction des Schalles. Pogg. Ann. 1852 LXXXV, pag. 378 bis 384. — Ann. de chim. 3 Ser. XXXV, pag. 505 bis 508. Philosoph. Mag. 4. Ser. V. pag. 73 bis 77. Archiv. de scienc. phys. XXII, pag. 261 bis 262. — Cosmos I, pag. 143 bis 144. — Berl. Ber. für 1852, VIII, pag. 156 bis 157. — Daguin Physique, 2. Edit. pag. 483 bis 485.

3. C. Hajech über die Brechung des Schalles in Giornale dell' Imper. Reale Instituto Lombardo di scienze etc. VIII, pag. 404 bis 410. — Cimento V, pag. 5 bis 14. Arch. de sciences physiques XXX, pag. 128 bis 130. — Berl. Ber. für 1856, XII, pag. 217 bis 220. — Pogg. Ann. 1858, CIII, pag. 163 bis 166. — Ann. d. chim. LIV, pag. 438 bis 440. — Daguin Physique 2. Edit. pag. 485.

4. König's Catalog für Akustik 1865, pag. 16, Nr. 73.

C. Änderung der Tonhöhe durch Bewegung der Schallquelle oder des Beobachters (subjective Tonhöhe).

1. Doppler's „Theorie des farbigen Lichtes der Doppelsterne. Prag 1842". — Doppler in den Wien. akad. Berichten 1852, VIII. pag. 91 bis 97, nebst Literatur hiezu.

2. Über die Theorie des Farbenwechsels durch Bewegung, siehe Note 1: ferner: Berl. Bericht für 1845, I. Band, pag. 155 bis 159. — Mach in Pogg. Ann. 1861. CXII. pag. 68 bis 76 und 1862 CXVI. pag. 387. — Wiener akad. Berichte 1852, VIII. pag. 91 bis 97, nebst Literatur. Mädler Wien. akad. Ber. 1861 XLIII, 2. pag. 285 bis 291; ferner Berl. Ber. für 1862, XVII. pag. 205 bis 208.

3. Doppler in seiner Theorie des farbigen Lichtes, die ersten Seiten.

4. Petzwal, Wien. akad. Ber. VIII. pag. 584 und Mach in Schlömilch Zeitschrift für Mathem. 1861, VI. pag. 125.

5. Mach, Pogg. Ann. 1861, CXII. pag. 60.

6. Mach, Pogg. Ann. 1861, CXII. pag. 58 u. s. f. (aus den Wien. akad. Ber. Band XLI, pag. 543.) — Mach in der Zeitschrift für Mathem. von Schlömilch für 1861, VI. pag. 120 bis 126. — Pogg. Ann. 1862, CXVI. pag. 333 bis 338.

7. Petzwal: Über ein allgemeines Princip der Undulationslehre, Gesetz der Erhaltung der Schwingungsdauer in den Wien. acad. Ber.

1852, VIII. pag 134; ferner VIII. pag. 567; IX. pag. 699; XLI. pag. 581. Ritter von Ettingshausen in diesen Streitsachen Wiener akad. Bericht VIII. pag. 593 bis 594, ferner IX. pag. 27 bis 30; Doppler's Entgegnungen, Wien. akad. Ber. 1852, VIII. 587 bis 593; ferner Bnd. IX (1852), pag 217 bis 225. — Bezüglich der Intensität bei bewegter Tonquelle: Doppler Pogg. Ann. 1851. LXXXIV. pag. 262 bis 267.

8. Über die Tonänderung durch Bewegung in Pogg. Ann. LXVI. pag. 321 und Wien. akad. Ber. V. pag. 154. — Berl. Ber. 1845. I. pag. 157.

9. Uber Scott Russel's Versuche bezüglich der Änderung der Tonhöhe durch Bewegung: Moigno Repertoire d'optique moderne, Paris 1850.

10. Nach Doppler in Pogg. Ann. 1851, LXXXIV. pag. 262.

11. Pogg. Ann. 1861, CXII. pag. 65.

12. Wien. akad. Ber. V. pag. 154.

13. Pogg. Ann. 1861, CXII. pag. 65.

14. Pogg. Ann. 1861, CXII. pag. 66 bis 68 und 1862, CXVI. pag. 335 bis 336.

15. Eisenlohr's Lehrbuch der Physik, 9. Auflage, pag. 202. Das Mundstück der Pfeife wurde mit einem Trichter versehen und dieser an einem Stab befestigt, der sich schnell um seine Mitte drehte.

16. König's Katalog, 1865, pag. 16, Nr. 73.

17. Die Tonschwankung, welche wir so häufig von den uns umschwirrenden Insecten zu hören bekommen, mag in der That zuweilen in der raschen Bewegung der Tonquelle gegen unser Ohr oder von demselben seinen Grund haben, natürlich nur dann, wenn man annehmen kann, dass sie ihre Fluggeschwindigkeit nicht ändern. Das Tieferwerden des Tones, kurz bevor das Insect sich niedersetzt, gehört freilich nicht hieher und hat in der Verlangsamung des Fluges seine Ursache. J. Oppel hat diesen Fall studiert*). Mücken oder Stubenfliegen, welche sich nahe seinem Ohr niedersetzten, ließen einen Ton hören, der um eine große Terz bis Quart tiefer war, als jener, den sie beim Aufjagen gaben. Eine Fliege erzeugt beim Wegfliegen den Ton e^0 und beim Niederlassen h^{-1}. Davonfliegende Mücken gaben f^0 und sich zur Ruhe begebende e^0 Die Töne wurden nach der Stimmgabel geschätzt. Eine beim Ohr vorübereilende Fliege ließ einen Ton e^0 bis es^0 vernehmen

*) J. Oppel, akustische Schätzung der wachsenden Fluggeschwindigkeit von Insecten im Jahresbericht des Frankfurter Vereines 1860—61, pag. 51—52; ferner Berl. Ber. für 1861, XVII. pag. 169.

— ob dies nicht eine von der Bewegung der Tonquelle herrührende Tonschwankung war? Jedenfalls dürften die in Rede stehenden Tonschwebungen vom Wechsel der Fluggeschwindigkeiten und endlich bei nahezu constanter Fluggeschwindigkeit von der Bewegung der Tonquelle, d. i. des am Ohre vorbeifliegenden Insectes herrühren.

Ich habe bemerkt, so oft ein Insect rasch an meinem Ohr vorbeischoß, wurde der Ton nicht nur schwächer, sondern tiefer — warum sollte der Flug gerade immer im Vorbeikommen an meinem Ohr verlangsamt, warum nicht einmal auch beschleunigt werden? Und warum sich überhaupt stets die Eile des Insectes gerade beim Ohr ändern? Hier scheint die Tonvertiefung nur von der Bewegung der Tonquelle herzurühren.

18. Ein Stock, der einfach von oben nach unten oder von unten nach oben nahezu in einem halben Kreise geschwungen wird, lässt einen Ton hören, der in der Mitte am höchsten ist — sehr begreiflich, da zu beiden Seiten die Geschwindigkeit gegen den Anfang und gegen das Ende abnimmt; ein Stock hingegen, der an einer starken Schnur rasch im Kreise mit nahezu gleichförmig gewordener Geschwindigkeit geschwungen wird, gibt Tonschwankungen, welche von der Annäherung und Entfernung des rasch bewegten Stabes zu kommen scheinen; ebenso verhält es sich mit der Tonschwankung einer kürzeren Peitsche, welche man auf der Rotationsmaschine in raschen Umlauf versetzt. Das freie Ende der Peitsche wurde zuweilen mit kurzen parallelepipedischen Hölzern versehen, um die Tonhöhe zu ändern. Da bei diesem Verfahren ein Gegenversuch wie bei Dr. Mach's Pfeife nicht möglich ist, auch die gleichbleibende Umlaufs-Geschwindigkeit nicht garantirt, sondern nur sehr wahrscheinlich war; so bleibt die Sache immerhin zweifelhaft, obwol viele Hörer, denen ich den Versuch vorführte, geneigt waren, die Doppler'sche Theorie als Erklärung gelten zu lassen.

Inhalt.

Seite

Vorwort III

Einleitung VII

I. Resonatoren und Vocal-Apparate nach Helmholtz 1

Haupteigenschaften des Klanges 1. — Näheres über die Klangfarbe 2. — Theorie und Geschichtliches bezüglich der Klangfarbe 3. — Resonatoren von Helmholtz 5. — Nutzen der Resonatoren 7. — Arten der Resonatoren 8. — Membranen als klanganalysierende Mittel 11. — Die Saiten als klanganalysierende Mittel 13. — Rückblick 16. — Theorie über die Vocale und Consonanten 17. — Princip des „Vocal-Apparates" nach Helmholtz 20. — Näheres über den Helmholtz'schen Vocal-Apparat 23. — Versuche von Helmholtz mit dem Vocal-Apparat 26. — Der Phasenunterschied der Theiltöne und die Klangfarbe 28. — Das Ohr und die Klangfarbe 31. — Zusammenfassung 33.

II. Vielstimmige Sirenen 36

Schwebungen und Stösse 36. — Das Gesetz bezüglich der Geschwindigkeit der Stösse 36. — Erklärung der Stöfse 37. — Die Stöfse und der Combinationston 37. — Neue Theorie der Combinationstöne von Helmholtz 38. — Differenz- und Summationstöne nach Helmholtz 40. — Zusammenfassung der Gründe für die Helmholtz'sche Theorie der Combinationstöne 41. — Was wird aus den schnellen Schwebungen? (Consonanz und Dissonanz.) 41. — * Dr. Prof. Mach's Versinnlichungsschieber für die Beurtheilung der Consonanz und Dissonanz 232. — Vielstimmige Sirene von Dove 44. — * Opelt's Sirene, angefertigt von König 234. — Erklärung der Stärke der Combinationstöne bei der Dove'schen vielstimmigen Sirene 47. — * Seebeck's Sirene in neuer Construction von König 235. — Vielstimmige Doppelsirene von Helmholtz 48. — Interferenz-Experimente mittelst der Helmholtz'schen mehrstimmigen Doppelsirene 51. — Versuche über die Schwebungen mit Hilfe der Helmholtz'schen Doppel-Sirene 53.

III. Die Tonschreibekunst, Phono- oder Vibrographie 55

Phonautograph und Phonautogramm nach Weber 55. — Vibrograph nach Duhamel 56. — Vibrograph nach König 57. — Vibrograph nach Wertheim 59. Praktische Winke bezüglich der Vibrographie 61. — Leistungen der Vibrographen 63. — Apparat (Vibrograph) für die Combination zweier paralleler Schwingungsbewegungen, welche in zwei verschiedenen Körpern erfolgen 64. — Apparat (Vibrograph) für die Combination zweier zu einander senkrechten Schwingungsbewegungen, welche in zwei verschiedenen Körpern erfolgen 65. — Bemerkungen zu den Combinations-Vibrographen 65. — Näheres über die König'schen Stimmgabeln 67. — Anwendung der Vibrographie zum Studium verschiedener physikalischer Fragen von Laborde 69. — Membran-

Phonautograph nach Scott und König 71. — Bemerkungen zum Membran-Phonautographen 73. — Akustische Eigenschaften der Membranen 75. — König's Versuche mit dem Membran-Phonautographen 77. — Versuche über die Klangfarbe mittelst des Membran-Phonautographen von F. C. Donders 81. — Phonautogramme 82. — Rückblick 92. — Die Phonautogramme und die Reproduction der Schwingungen 92. — Die Phonautogramme bringen die Schwebungen bleibend vor das Auge 92. — Akustisches Album von König 93. — Princip des „Telephon" von Reis 94. — Näheres über das Telephon 96. — Versuche mit dem Telephon 98. — *Reis über das von ihm erfundene Telephon 241. — *König's Membranen-Stethoskop 243.

IV. Anwendung der Optik in der Akustik 104

Princip der optisch-akustischen Methode 104. — Combination zweier paralleler Schwingungsrichtungen von zwei Stimmgabeln 105. — Combination zweier rechtwinkliger Schwingungsrichtungen von zwei Stimmgabeln 107. — Bemerkungen in praktischer Beziehung 110. — Beurtheilung und Anwendung der optisch-akustischen Methode 111. — Der Comparator von Lissajous 113. — Vibrations-Mikroskop von Helmholtz 114 und * 245. — Geschichtlicher Rückblick bezüglich der optisch-akustischen Methode 116. — Ein Kaleidophon von wissenschaftlichem Werthe 117. — Näheres über die Entstehung der kaleidophonischen Lichtfiguren 120. — Melde's Universal-Kaleidophon 121. — Wheatstone's Apparat zur Hervorbringung der Kaleidophonischen Lichtfiguren auf mechanischem Wege, angefertigt von König 123. — *Wheatstone's Versinnlichungs-Apparat für die senkrechte Combination elliptischer Schwingungen 246. — Eisenlohr's Pendel-Apparat zur Versinnlichung der kaleidophonischen Lichtfiguren 126. — Mos' Pendel-Apparat zur Versinnlichung der kaleidophonischen Lichtfiguren 127.

V. Apparate für schwingende Saiten 129

Phonoskop nach Plassiart, angefertigt von König 129. — Melde's Stimmgabel-Apparat zum Hervorrufen von Schwingungen an fadenförmigen Körpern 129. — Einige einfache Versuche mittelst Melde's Stimmgabel-Apparat 134. — Melde's Apparat für das Studium der stehenden Wellen an fadenförmigen Körpern, welche an beiden Enden mit schwingenden Körpern verbunden sind 140. — Über den ursprünglichen Versuch Melde's bezüglich der Erregung von stehenden Wellen an fadenförmigen Körpern 140. — Zusammenfassung und Rückblick 143.

VI. Tönende Stäbe 144

Stimmgabel-Apparat zum Stimmen nach Scheibler, angefertigt und ausgestellt in London von König 144 und * 249. — * Der Normal-Ton der Akustiker und Physiker $c^1 = 512$ einfachen Schwingungen 249. — *König's „Taubleau general" für die Schwingungszahlen der Töne 250. — Scheibler's Tonmesser 148. — Geschichte der Scheibler'schen Erfindung 150. — Terquem's Stäbe 153. — * Die doppelte Brechung des Lichtes in tönenden Glasstäben (das Polarisations-Vibroskop nach Dr. August Kundt) 252. — * Geschichtliches bezüglich des Polarisations-Vibroskopes 252. — * Grundgedanke zum Polarisations-Vibroskop 252. — * Beste Lage des Glasstreifens gegen die Polarisations-Ebene 253. — * Die Newton'schen Farben an tönenden Stäben 254. — * Doppelte Brechung an transversal vibrierenden Glasstäben nebst Erklärung 255. — *Dr. Kundt's Apparat bezüglich des doppelt brechenden Lichtes in tönenden Glasstäben 257. — *Rückblick hinsichtlich des Polarisations-Vibroskopes 258.

Seite

VII. Tönende Platten 156

Die ersten Versuche zur mathematischen Begründung der Chladni'schen Klangfiguren 156. — Grundgedanke der Wheatstone'schen Theorie der Chladnischen Klangfiguren 157. — Verallgemeinerung des Vorigen 159. — Gesetze über die Zusammensetzung schiefer Knotenlinien 160. — Vierfache Zusammensetzung primärer Schwingungen 160. — Ergebnisse aus der vierfachen Combination primärer Schwingungen 161. — Wheatstone's Theorie gegen die Erfahrung gehalten 162. — Grenzen der Zusammensetzung primärer Schwingungsweisen 163. Wheatstone's Klangfiguren auf Holzplatten 165. — Savart's Klangfiguren auf ungleichartig elastischen Platten 165. — Die Gebrüder Weber und Wheatstone bezüglich der Theorie der Klangfiguren 165. — Zusammenfassung des Vorigen 166. — König's experimentelle Erweiterung der Wheatstone'schen Theorie 166 und *258.

VIII Die Luft als tönender Körper (Pfeifen) 170

Pfeifen nach Cavaillé-Coll 170. — Einfluss eines äusseren Tones auf die Flamme einer chemischen Harmonica 172. — Optische Analyse der singenden Flammen 177. — Zusammenfassung. Einfachster Apparat für die singenden Flammen 182. — Der Tonflammenapparat von Schaffgotsch 183. — Ältere Geschichte der chemischen Harmonica 184. — Neuere Geschichte der chemischen Harmonica 188. — Tönende Luftsäulen, angeregt durch glühende Drahtnetze 193. — König's Röhre zum Nachweis der in ihr befindlichen Schwingungs-Knoten und Schwingungs-Bäuche mittelst manometrisch bewegter Flammenzeiger 197. — Interferenz-Pfeifen mit Flammenzeigern 199. — Königs Resonatoren-Flammenapparat zur Analyse des Klanges 202.

IX. Apparate bezüglich der Fortpflanzung des Schalles 205

A) Ermittlung der Schallgeschwindigkeit auf kleineren Strecken 205

Princip der Methode, die Schallgeschwindigkeit bei kleineren Standlinien zu bestimmen 205. — R. König's Apparat, um die Geschwindigkeit des Schalles für kürzere Standlinien zu messen 207. — Geschichtliches bezüglich der Schall-Coïncidenzen in ihrer Anwendung zur Messung der Schallgeschwindigkeiten 209.

B) Die Brechung der Schallstrahlen 212

Über die Brechung des Schalles 212. — Näheres über die Schall-Linse von C. Sondhaus 213. — Das Schallprisma von Hajech 214. — Hajech's Prisma für die Refraction des Schalles, angefertigt und ausgestellt zu London 1862 von R. König in Paris 217.

C) Die Änderung der Tonhöhe durch rasche Bewegung der Schallquelle oder des Beobachters 218

Die Tonhöhe wird eine andere, wenn die Tonquelle oder der Beobachter sich schnell von oder gegen einander bewegen 218. — Berechnung der scheinbaren oder subjectiven Tonhöhe 219. — Der Beobachter ruht und die Schallquelle ist in Bewegung gegen ersteren oder von demselben 220. — Prüfung der Doppler'schen Theorie durch Versuche 221. — Versuche auf Eisenbahnen 221. — Wahrnehmung auf andern schnellen Fahrzeugen 222. — Dr. Mach's Apparat zum Nachweise der geänderten Tonhöhe durch Bewegung 222. — Nachweis mittelst vermehrter oder verminderter Stöfse 224. — *Die Tonschwankung, welche man bei fliegenden Insecten und geschwungenen Körpern wahrnimmt 268.

Seite

Anhang*) 226

Literatur und Ergänzungen zu I. Die Resonatoren und der Vocal-Apparat . . 227

" " " " II. Vielstimmige Sirenen 231

" " " " III. Vibrographie 238

" " " " IV. Optisch-akustische Methode 244

" " " " V. Schwingende Saiten 247

" " " " VI. Tönende Stäbe 248

" " " " VII. Tönende Platten 258

" " " " VIII. Pfeifen 261

" " " " IX. Fortpflanzung des Schalles 265

A. Literatur zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit auf kurzen Strecken . . . 265

B. Literatur zur Brechung des Schalles 266

C. Literatur und Ergänzungen zur Änderung der Tonhöhe durch Bewegung der Schallquelle oder des Beobachters (subjective Tonhöhe). 266

*) Die Ergänzungen sind im Inhalts-Verzeichniss des Haupttextes am betreffenden Orte aufgenommen und mit einem Sternchen (*) versehen worden.

Verbesserungen.

Seite	11	Anm. 5	lies	$ut_2 = c^0$	statt $ut_2 = c^0 = C$.
„	11	Tabelle Nr. 18	„	$re_5 = d^3$	„ $re = d^3$
„	12	oben	„	Fig. 4	„ Fig. 5
„	78	oben	„	Lissajous	„ Lissajons
„	143	unten 3. Zeile	„	genauem	„ genauerem
„	154	oben 1. Zeile	„	nahezu denselben Ton	statt denselben Ton.