

The Virtual Laboratory

Max-Planck-Institute for the History of Science, Berlin
ISSN 1866-4784 - http://vlp.mpiwg-berlin.mpg.de/

Helmholtz, Hermann. 1859. Ueber die Klangfarbe der Vocale. Annalen der Physik und Chemie 108: 280-290

http://vlp.mpiwg-berlin.mpg.de/references?id=lit28931

III. *Ueber die Klangfarbe der Vocale;* *von H. Helmholtz;*

(Mitgetheilt vom Hrn. Verf. aus den Gelehrt. Anzeig. d. k. bayerisch. Acad. d. Wiss.)

Ein musikalischer Ton wird hervorgebracht durch eine in gleichen und hinreichend kleinen Zeitabschnitten sich in gleicher Weise wiederholende periodische Bewegung der Luft. Innerhalb jeder einzelnen Schwingungsperiode bleibt die Bewegung dabei ganz willkürlich, wenn nur dieselbe Bewegung, welche innerhalb der ersten Periode stattgefunden hat, in allen folgenden Perioden ebenso wiederkehrt.

Wenn die Lufttheilchen während einer jeden Schwingungsperiode sich genau in derselben Weise einmal hin und her bewegen, wie der Schwerpunkt eines Pendels bei einer sehr kleinen Schwingung thut, so hören wir nur einen einfachen und einzigen Ton, dessen musikalische Höhe durch die Anzahl der gleichen Perioden bestimmt ist, die in einer Sekunde enthalten sind. In diesem Falle ist sowohl die Geschwindigkeit wie der Druck der Luft in jedem einzelnen Punkte der schwingenden Luftmasse einfach mathematisch auszudrücken durch einen Ausdruck von der Form $A \sin (2\pi n t + c)$. Ich selbst habe in einer früheren Arbeit über die Combinationstöne eine Methode nachgewiesen, vermittels deren man dergleichen einfache pendelartige Schwingungen der Lufttheilchen oder, wie ich sie zu nennen vorschlug, *einfache Luftwellen,* hervorbringen kann. Ich benutzte dazu Stimmgabeln, die angeschlagen und frei in die Luft gehalten, ihre Schwingungen nicht in merklicher Weise der Luftmasse mittheilen. Wenn man sie aber vor die Oeffnung von Resonanzröhren hält, deren tiefster Ton mit dem der Stimmgabel im Einklang ist, so wird dieser tiefste Ton der Stimmgabel der Luft kräftig mitgetheilt. Wenn auch die Stimmgabel beim Anschlagen noch höhere Töne geben kann, so läfst es sich doch leicht so einrichten, dafs die höheren

Töne der Stimmgabel nicht im Einklang mit den höheren Tönen der Resonanzröhre sind, und deshalb, durch die Resonanzröhre nicht verstärkt, unhörbar bleiben.

Wenn aber die Luftbewegung während einer Schwingungsperiode nicht dem einfachen Gesetze der Pendelbewegung folgt, sondern einem beliebigen anderen Gesetze, so hört man bei gehörig gerichteter Aufmerksamkeit der Regel nach mehrere Töne, selbst wenn die Luftbewegung nur von einem einzigen tönenden Körper hervorgebracht wird. Nun kann nach dem bekannten Theorem von Fourier eine *jede* periodische Bewegung der Luft mathematisch ausgedrückt werden durch eine Summe von Gliedern, deren jedes von der Form $A\sin(2\pi mt+c)$ ist, und also einer einfachen pendelartigen Schwingung der Lufttheilchen entspricht. In diesem Ausdrucke sind A und c abhängig vom Werthe von m, und m durchläuft die Werthe n, $2n$, $3n$, $4n$ u. s. w., wo n wieder wie früher die Zahl der einfachen Perioden in der Sekunde bedeutet.

In allen solchen Fällen nun, wo die Form der Bewegung des tönenden Körpers theoretisch vollständig gefunden werden kann, und wo man sich diese Bewegung mathematisch als eine Summe von solchen Sinusgliedern dargestellt hat, hört das Ohr bei gehöriger Aufmerksamkeit in der That die Töne von n, $2n$, $3n$ u. s. w. Schwingungen, obgleich es in allen den Fällen, wo eine solche Luftbewegung nicht wirklich von verschiedenen Tonquellen her hervorgerufen ist, eben nur eine mathematische Fiction ist, dafs eine Anzahl von einfachen pendelartigen Schwingungen der Lufttheilchen neben einander existiren.

Die Allgemeinheit dieser Wahrnehmung veranlafste das berühmte frühere Mitglied dieser Akademie G. S. Ohm es als Definition des einfachen Tones aufzustellen, dafs ein solcher nur hervorgebracht werde durch eine einfache pendelartige Luftbewegung von der Form $A\sin(2\pi mt+c)$. Diese Definition des Tons von Ohm wurde von Seebeck heftig angegriffen, welcher behauptete, dafs die Definition zu eng sey, und dafs die Empfindung eines einzigen Tons

auch durch Luftbewegungen hervorgerufen werden könnte, welche beträchtlich von der Form der einfachen pendelartigen Schwingung abwichen. Ich kann hier nicht auf eine vollständige Widerlegung der Einwürfe von Seebeck eingehen, und behalte mir vor bei einer anderen Gelegenheit darauf zurückzukommen. Ich bemerke nur, dafs seine Einwürfe wesentlich auf der Schwierigkeit beruhen, die man in vielen Fällen findet, die höheren Töne wahrzunehmen. In der That mufs man hier wie bei allen Sinneswahrnehmungen zweierlei von einander trennen, nämlich die unmittelbare körperliche Empfindung des Hörnerven, und die Vorstellung, welche in Folge davon durch psychische Processe entsteht, und in welcher auf das Vorhandenseyn eines bestimmten tönenden Körpers geschlossen wird. In der unmittelbaren Empfindung werden allerdings die einzelnen vorhandenen einfachen Töne bei gehörig angespannter Aufmerksamkeit immer von einander getrennt, während sie in der Vorstellung zusammenfliefsen in den sinnlichen Eindruck, den der Ton eines bestimmten tönenden Körpers auf unser Ohr macht, und es gehört meist eine künstliche Unterstützung der Aufmerksamkeit dazu, um die einzelnen Elemente der zusammengesetzten Empfindung von einander zu scheiden, ebenso wie es z. B. besondere Beobachtungsmethoden erfordert, um sich zu überzeugen, dafs die Anschauung der Körperlichkeit eines betrachteten Gegenstandes auf der Verschmelzung zweier verschiedener Bilder desselben in beiden Augen beruhe.

Ich habe deshalb auch früher schon vorgeschlagen, die ganze zusammengesetzte Empfindung, wie sie die von einem einzelnen tönenden Körper ausgehende Luftbewegung erregt, mit dem Namen *Klang* zu bezeichnen, den Namen des *Tons* aber zu beschränken auf die einfache Empfindung, wie sie durch eine einfache pendelartige Luftbewegung hervorgebracht wird. Die Empfindung eines Klanges ist demnach in der Regel aus der Empfindung mehrerer einfacher Töne zusammengesetzt. Läfst man Alles, was Seebeck in dem Streite mit Ohm behauptet hat, vom Klange gelten, und

was Ohm behauptet hat, vom Tone, so sind beide ausgezeichnete Akustiker mit ihren Behauptungen im Rechte, und beide Behauptungen können ungestört neben einander bestehen.

Diese Bezeichnung wollen wir im Folgenden beibehalten, und dabei festsetzen, dafs unter Tonhöhe eines Klanges die Höhe des tiefsten darin enthaltenen einfachen Tones von n Schwingungen, seines *Grundtons* oder *ersten Tons* verstanden werde, während wir die übrigen als Obertöne bezeichnen. Den Ton von $2n$ Schwingungen, die höhere Octave des vorigen bezeichne ich als *zweiten Ton*, den von $3n$ Schwingungen als *dritten Ton* u. s. w.

Ich bin nun daran gegangen die Consequenzen des Ohm'schen Satzes für die Lehre von der Klangfarbe zu untersuchen, und danke der Gnade Sr. Maj. des Königs von Bayern die Geldmittel zur Anschaffung der Apparate für diese Untersuchung. In physikalischer Beziehung war man längst zu der Erkenntnifs gelangt, dafs dem, was unser Ohr als verschiedene Klangfarbe unterscheidet, die verschiedene Form der Luftwellen innerhalb jeder einzelnen Schwingungsperiode entspräche; aber freilich beruhte dieser Satz nur darauf, dafs keine andere Möglichkeit übrig blieb, die Verschiedenheiten der Klangfarbe zu erklären, und bedurfte noch der experimentellen Bestätigung, die durch meine Versuche nun gegeben werden kann. In physiologischer Beziehung liefs sich aus Ohm's Satze noch eine weitere Consequenz ziehen.

Da nämlich alle Schwingungen die nicht der einfachen pendelartigen Bewegung entsprechen, in der Empfindung des Ohres zerlegt werden in eine gewisse Zahl einfacher Töne, so müssen Klänge von verschiedener Klangfarbe und gleicher Höhe des Grundtons für das Ohr durch verschiedene Stärke der harmonischen Obertöne verschieden seyn. Wenn wir nun absehen von der verschiedenen Weise, wie die Klänge verschiedener Instrumente und Stimmen anheben oder ausklingen, ferner von den mancherlei sausenden, kratzenden, knarrenden, unregelmäfsigen Geräuschen, welche viele davon begleiten, und die nicht eigentlich zu dem mu-

sikalischen Theile des Tones zu rechnen sind, und den Theil der Klangfarbe, der eben nicht von den genannten Nebenumständen abhängt, die *musikalische Klangfarbe* des Tons nennen, so war die aufzustellende Frage: *Unterscheidet sich die musikalische Klangfarbe nur durch die verschiedene Stärke der darin enthaltenden Nebentöne*?

Denkt man eine Wellenform aus den in ihr enthaltenen einfachen Wellen zusammengesetzt, so kommt es nicht nur darauf an, dafs die letzteren die richtige Schwingungsweite haben, sondern auch darauf, dafs die *Phasenunterschiede* zwischen ihnen und dem Grundtone richtig gewählt werden. Wir bekommen ganz verschiedene Wellenformen, wenn wir die Welle eines Grundtones und seiner ersten höheren Octave zusammensetzen, je nachdem wir das Verdichtungsmaximum des Grundtons mit dem der Octave zusammenfallen lassen, oder etwa mit dem Verdichtungsminimum der Octave oder mit irgend einer dazwischen liegenden Phase der Octave, und es concentrirte sich nur jene Frage in folgende speciellere Form: *Beruht die Unterscheidung der musikalischen Klangfarbe nur in der Empfindung von Obertönen verschiedener Stärke, oder unterscheidet das Ohr auch die Phasenunterschiede*?

Die Entscheidung dieser Frage wurde am directesten gewonnen, wenn man geradezu versuchte Töne verschiedener Klangfarbe durch directe Zusammensetzung einfacher Töne, wie man sie durch Stimmgabeln erzeugen kann, herzustellen. Als eines der passendsten Objecte der Nachahmung boten sich die verschiedenen Vocale der menschlichen Sprache dar, weil diese als gleichmäfsig anhaltende musikalische Töne hervorgebracht und ziemlich, wenn auch nicht ganz frei von unmusikalischen Geräuschen gehalten werden können.

Mein Apparat besteht aus einer Reihe von 8 Stimmgabeln, die dem B (in der tiefsten Octave der Männerstimmen), und seinen harmonischen Obertönen bis zum b_2 (in den höchsten Sopranlönen) entsprechen, nämlich den Tönen B, b, f_1, b_1, d_2, f_2, as_2 und b_2. Jede Stimmgabel ist zwi-

schen den Schenkeln eines kleinen hufeisenförmig gebogenen Elektromagnets befestigt, und mit einer abgestimmten Resonanzröhre verbunden. Die Oeffnungen der Resonanzröhren sind mit beweglichen Deckeln versehen, welche durch Fäden, deren Enden an einer kleinen Claviatur befestigt sind, fortgezogen werden können. Die Stimmgabeln werden in Bewegung gesetzt durch intermittirende elektrische Ströme, die nach dem Princip des Neef'schen Hammers erzeugt werden, und deren Zahl in der Sekunde gleich ist der Schwingungszahl der tiefsten Gabel, nämlich 112. Die Einrichtungen sind so getroffen, — ich hatte dabei mit ziemlich bedeutenden Schwierigkeiten zu kämpfen — dafs man, nachdem der Apparat in Gang gesetzt ist, kaum ein leises Summen von den Gabeln hört, so lange die Resonanzröhren alle geschlossen sind; sobald man aber mittels der Claviatur eine oder einige der Resonanzröhren öffnet, treten die betreffenden Töne kräftig hervor. Die Stärke der Töne, welche man angeben will, kann man leicht reguliren, indem man die betreffenden Röhren mehr oder weniger vollständig öffnet.

Ich verfuhr nun so, dafs ich erst die zwei tiefsten Töne allein combinirte, dann den dritten und allmählich immer mehrere hinzunahm, und die entstandenen Klänge mit der Stimme nachzuahmen suchte. So lernte ich allmählich die verschiedenen Vocalklänge mehr oder weniger vollständig nachbilden, und zwar ziemlich gut und deutlich U, O, Oe, E, etwas weniger gut J, Ue, bei welchen das Sausen der Luft in der Mundhöhle, auf dessen verschiedenen Charakter bei den Vocalen Donder's aufmerksam gemacht hat, verhältnifsmäfsig am lautesten ist, und weniger gut auch A, und Ae, weil bei diesen eine sehr grofse Anzahl von Tönen zusammenwirken mufs, die sich nicht alle einzeln so vollständig in ihrer Stärke beherrschen lassen, ja beim A sogar noch eine Reihe höherer Töne hinzutreten mufste, für welche ich keine Gabeln mehr hatte.

Ueberhaupt ist zu bemerken, dafs die mittels Stimmgabeln zusammengesetzten Vocaltöne den gesungenen Tönen

der menschlichen Stimme ähnlicher waren als den gesprochenen. Bei dem trockenem Klange der gewöhnlichen Sprache wählt man eine andere Art der Intonation, wobei der Grundton viel schwächer zum Vorschein kommt, als die höheren Nebentöne und die Geräusche; dadurch eben aber werden die Unterschiede der Klangfarbe viel deutlicher als beim Singen, wo der Grundton stärker hervortritt, und die Nebentöne mehr bedeckt. Am ähnlichsten sind die künstlich zusammengesetzten Vocale denen, welche auf einem Claviere nachklingen, wenn man einen der Vocale stark hineinsingt.

Im Einzelnen waren meine Resultate nun folgende:

Der einfache Grundton hat verglichen mit den zusammengesetzten Klängen die Klangfarbe des U. Noch etwas deutlicher wird der Vocal, wenn der Grundton ganz schwach vom dritten Tone begleitet wird.

Das O entsteht, wenn der Grundton kräftig von der höheren Octave begleitet wird. Eine ganz schwache Begleitung durch den dritten und vierten Ton ist vortheilhaft aber nicht nothwendig.

Das E wird namentlich durch den dritten Ton charakterisirt, bei mäfsiger Stärke des zweiten. Schwach kann man auch den vierten und fünften mitklingen lassen.

Der Uebergang von O zu E geschieht also dadurch, dafs man den zweiten Ton abnehmen, den dritten anschwellen läfst, giebt man beide genannte Nebentöne stark an, so entsteht Oe.

Ue entsteht durch den Grundton der in mäfsiger Stärke von dem dritten Tone begleitet ist.

Bei J mufs man den Grundton schwächen, den zweiten verhältnifsmäfsig zum Grundton stark, den dritten ganz schwach, aber den vierten, der für diesen Vocal charakteristisch ist, stark angeben, den fünften dazu in mäfsiger Stärke gesellen. Man kann ohne wesentliche Aenderung des Charakters übrigens die schwachen Töne, den dritten und fünften, auch weglassen.

Bei A und Ae dagegen sind es die höheren Nebentöne,

welche charakteristisch werden. Man kann den zweiten Ton ganz weglassen, den dritten schwach angeben, dann aber die höheren Töne hervortreten lassen, soweit es die Stärke der Gabeltöne erlaubt, die aber für diese höchsten Töne überhaupt bei der angegebenen Erregungsweise gering ist. Beim Ae kommt es namentlich auf den vierten und fünften Ton an, beim A auf den fünften bis siebenten. Wenn man bei A den dritten Ton ganz wegläfst, bekommt es einen nasalen Klang.

Uebrigens mufs ich bemerken, dafs die angegebenen Verhältnisse zwischen Grundton und Obertönen zunächst nur zu beziehen sind auf die Tonhöhe meiner Gabeln. Der Grundton *B* entspricht etwa der Tonhöhe, in welcher mäfsig tiefe Männerstimmen zu sprechen pflegen. Ich habe meine Untersuchungen über die Vocale in höheren Tonlagen noch nicht abzuschliefsen Zeit gehabt, mit den Gabeln liefs sich die Untersuchung darüber nicht viel weiter führen, weil mir die höheren Töne fehlten. Wählte ich das *b*, welches bisher zweiter Ton war, als Grundton, so hatte ich nur drei dazu passende Nebentöne. Mit diesen liefsen sich U, O, Oe, E, Ue und J nach der gegebenen Regel herstellen, nur unvollkommen wegen Mangels der höheren Töne A und Ae, so dafs auch hier dasselbe Verhältnifs der Nebentöne zum Grundtone entscheidend für den Vocalcharakter zu seyn schien, wie in der tieferen Lage. Es entspricht diese höhere Lage ungefähr der, in welcher Altstimmen zu sprechen pflegen.

Dagegen habe ich die Untersuchung weiter geführt durch directe Beobachtung der menschlichen Stimme mittels eines besonderen Hülfsmittels, welches auch den ganz Ungeübten in den Stand setzt, die Obertöne jedes musikalischen Tons herauszuhören, was bisher eine Aufgabe war, die nur durch andauernde Uebung und mit grofser Anstrengung der Aufmerksamkeit gelöst werden konnte. Ich benutze dazu nämlich eigenthümliche Resonatoren, die an das Ohr selbst angesetzt werden. Die beste Form dieser Resonatoren sind Glaskugeln mit zwei Oeffnungen, von denen die eine in

einen ganz kurzen trichterförmigen Hals ausläuft, dessen Ende in den Gehörgang einpafst. Bewaffnet man ein Ohr mit einem solchen Resonator; während man das andere schliefst, so hört man die meisten äufseren Töne nur sehr gedämpft, denjenigen aber, der dem eigenen Tone der Glaskugel (diese in Verbindung mit dem Gehörgange genommen) entspricht, in aufserordentlicher Stärke; in derselben Stärke treten nun auch diejenigen Obertöne äufserer Töne auf, welche dem Tone der Glaskugel entsprechen. Setzt man z. B. eine Kugel an das Ohr, deren Ton f_1 ist, und singt auf B, dessen dritter Ton jenes f_1 ist, die Vocale, so hört man bei *u*, *i*, *ü*, *a*, *ä* nur schwach den Ton der Kugel, während er bei *o* und *ö* sich stark hervorhebt, und bei *e* gewaltig in das Ohr hineinschmettert. Mit Hülfe solcher Resonatoren werden eine Menge akustischer Phänomene, die objectiven Combinationstöne, die Obertöne und ihre Schwebungen, die sonst schwer zu untersuchen waren, aufserordentlich leicht zugänglich. Die damit ausgeführte Untersuchung der menschlichen Stimmtöne bestätigte nun durchaus, wenn auf B gesungen wurde, die Resultate, die ich mit den Stimmgabeln erhalten hatte, für höhere Stimmlagen traten aber einige Abweichungen ein. Es stellte sich nämlich heraus, dafs für die Nebentöne einzelner Vocale gewisse Gegenden der musikalischen Scala besonders günstig sind, so dafs die in diese Theile der Scala fallenden Nebentöne stärker werden als in anderen Höhelagen, so ist für das O die obere Hälfte der eingestrichenen Octave eine solche begünstigte Stelle. Der dritte und vierte Oberton, welche in der tiefen Lage des Vocals deutlich zu hören sind, liegen in dieser Gegend, und treten nicht so deutlich heraus, wenn O höher gesungen wird. Für das A ist die obere Hälfte der zweigestrichenen Octave begünstigt. Der 2., 3., 4. Ton, die in der tiefen Lage schwach waren, treten sehr mächtig heraus, wenn das A zwischen b und b_1 gesungen wird. Uebrigens fand ich mittels der beschriebenen Resonatoren, dafs namentlich beim Vocal A auch noch höhere schwach

hörbare Obertöne da sind, als meine Gabeln reichen. Es resonirte bei dem Vocal A gesungen auf *F*, noch eine Kugel merklich, welche auf es_3 abgestimmt war, welcher Ton 14mal so viel Schwingungen macht als jenes *F*.

Was nun die Einwirkung der Phasenunterschiede betrifft, so hat sich eine solche bei meinen Versuchen nicht gezeigt. Die Schwingungsphasen der Stimmgabeln habe ich nach der optischen Methode von Lissajou controliren können. Man kann erstens durch Umkehrung der elektrischen Ströme in dem Elektromagnet einer jeden einzelnen Gabel deren Schwingung um eine halbe Undulation verändern, so dafs Maximum und Minimum ihrer Abweichung mit einander vertauscht werden, und man kann ferner durch etwas aufgeklebtes Wachs die Gabeln ein wenig verstimmen, dann wird ihre Schwingung schwächer, und die Phasen verschieben sich desto mehr, je gröfser die Verstimmung ist, bis zur Gränze einer Viertel Undulation. Noch leichter auszuführen ist die Veränderung der Phasen der schwächeren Töne, wenn man sie bald durch gröfsere Entfernung der Resonanzröhren schwächt, wobei die Phase der Luftschwingung nicht verändert wird, bald durch unvollständige Oeffnung der Resonanzröhren, wobei eine Veränderung der Phasen der Luftwellen eintritt, wie aus den Resultaten einer theoretischen Arbeit über die Schallschwingungen hervorgeht, die gegenwärtig in Crelle's Journal für Mathematik gedruckt wird. Alle die Phasenänderungen, welche auf solche Weise hervorgebracht werden können, verändern nicht die Klangfarbe, wenn die Stärke der Töne dieselbe bleibt, so dafs also die früher gestellte Frage im Allgemeinen dahin beantwortet wird, dafs *die musikalische Klangfarbe nur abhängt von der Anwesenheit und Stärke der Nebentöne, die in dem Klange enthalten sind, nicht von ihren Phasenunterschieden.*

Indessen mufs ich gleich bemerken, dafs scheinbare Ausnahmen vorkommen. Es können sich bei hinreichend starken Tönen Combinationstöne einmischen, die je nach den Phasenunterschieden die primären Töne theils schwächen,

theils verstärken, so dafs dadurch auch Unterschiede der Klangfarbe eintreten. Hier glaube ich aber neben den übrigen Erfahrungen die Erklärung festhalten zu dürfen, dafs der Klangunterschied eben nur von dem Unterschiede der Tonstärke bedingt ist, welcher letztere aber unter solchen Verhältnissen vom Phasenunterschiede abhängt.

Ferner möchte ich den ausgesprochenen Satz vorläufig wenigstens noch einschränken auf die unteren, in der Scala weit auseinanderliegenden Nebentöne bis etwa zum 6. oder 8ten. Die höheren Nebentöne geben Dissonanzen mit einander und Schwebungen; und wenn nun eine Menge solcher schwebender Tonpaare zusammenwirken, wird es für die Empfindung wahrscheinlich nicht gleichgültig seyn, ob die Pausen aller dieser Schwebungen zusammenfallen oder nicht. Das hängt aber von den Phasenunterschieden ab. Uebrigens halte ich es auch für wahrscheinlich, dafs diese Masse hoher dissonanter Obertöne das bildet, was das Ohr als begleitendes Geräusch hört, und was wir schon von andrer Seite her ausgeschlossen haben von unserer Betrachtung der musikalischen Klangfarbe.

Ich habe schon an einem anderen Orte die Hypothese ausgesprochen, dafs jede Nervenfaser des Hörnerven für die Wahrnehmung einer besonderen Tonhöhe bestimmt ist, und in Erregung kommt, wenn der Ton das Ohr trifft, welcher der Tonhöhe des mit ihr verbundenen elastischen Gebildes (Cortischen Organs oder Borste in den Ampullen) entspricht. Danach würde sich die Empfindung verschiedener Klangfarben darauf reduciren, dafs gleichzeitig mit der Faser, welche den Grundton empfindet, gewisse andere in Erregung gesetzt werden, welche den Nebentönen entsprechen. Diese einfache Erklärung würde nicht gegeben werden können, wenn die Phasenunterschiede der tieferen Nebentöne in Betracht kämen.