universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Handbuch der Physiologie des Menschen

in vier Bänden (und einem Ergänzungsbande)

Physiologie der Sinne

Nagel, Wilibald A.

1905

Der Gehörssinn. Von K. L. Schaefer

urn:nbn:at:at-ubi:2-6074

Der Gehörssinn

von

K. L. Schaefer.

Frühere zusammenfassende Darstellungen des Gegenstandes:

E. Chladni, Die Akustik. 4. Teil. Leipzig 1802 u. 1830.

Joh. Müller, Handbuch der Physiologie des Menschen. 2. Band. Coblenz 1840.

E. Harless, Artikel „Hören" in Wagners Handwörterbuch der Physiologie. 4. Band. Braunschweig 1853.

H. v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen. 5. Ausgabe. Braunschweig 1896.

V. Hensen, Physiologie des Gehörs, in Hermanns Handbuch der Physiologie. 3. Band. Leipzig 1880.

C. Stumpf, Tonpsychologie. 2 Bände. Leipzig 1883 und 1890.

I. Von den Tonempfindungen.

Vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet sind die Töne pendel- oder sinusförmige Schwingungsvorgänge, die sich durch die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, die Schwingungszahl, oder durch ihre Schwingungsweite, die Amplitude, unterscheiden. Von der Schwingungszahl hängt das ab, was wir in der Empfindung als die Tonhöhe bezeichnen, von der Amplitude die Tonstärke. Aber nicht alle Arten von Sinusschwingungen lösen eine Tonempfindung aus, und nicht jede beliebige Veränderung eines physikalischen Tones wird als Wechsel der Höhe oder Stärke wahrgenommen. Damit ein Ton überhaupt hörbar sei, muß seine Schwingungszahl zwischen einer unteren und einer oberen Grenze liegen, muß seine Intensität ein bestimmtes Minimum, den Schwellenwert, überschreiten und darf seine Dauer nicht zu kurz sein; damit andererseits zwei bezüglich ihrer Höhe oder ihrer Stärke differente Töne auch als verschieden erkannt werden, ist es erforderlich, daß der Unterschied nicht unter ein gewisses Maß sinkt. Unsere Tonwahrnehmungen sind also in mehrfacher Hinsicht beschränkt.

a) Untere und obere Hörgrenze.

Wieviel Pendelschwingungen müssen mindestens in der Sekunde das Ohr treffen, damit eine Tonempfindung zustande kommt? Diese Frage nach der Höhe des tiefsten wahrnehmbaren Tones hat schon die älteren Akustiker beschäftigt. Preyer, dem wir eine viel zitierte Untersuchung[1]) über die untere Hörgrenze verdanken, hat auch die wichtigeren früheren Arbeiten

[1]) Grenzen der Tonwahrnehmung. Jena 1876.

über diesen Gegenstand zusammengestellt. Danach war Sauveur (1700) der erste, der mittels einer Orgelpfeife den tiefsten Ton bestimmte; er fand die Schwingungszahl $12^1/_2$. Chladni (1802) und Biot (1829) benutzten Saiten und erhielten als Grenze 16 Schwingungen. Savart kam 1831 mit seinem bekannten Zahnrade und einem rotierenden Stabe zu dem Resultat, daß noch sieben bis acht Schläge als Ton gehört würden, während ihm eine andere Versuchsanordnung die Zahl 32 ergab. Despretz (1845) verlegte die untere Hörgrenze noch weiter hinauf, indem er das Contra-G als tiefsten Ton bezeichnete. Helmholtz vermochte den Ton B_2 einer Saite, deren Oberschwingungen gedämpft waren, kaum noch zu hören, fand aber den Ton einer Stimmgabel, die 28 Schwingungen machte, eben noch wahrnehmbar, worin Wolf (1871) ihm beistimmte. Preyer wählte als Schallquellen Metallzungen von 8 bis 40 Schwingungen. Die Tonempfindung begann bei seinen am besten hörenden Versuchspersonen mit 16 Schwingungen; den Ton 23 hörte jeder mit normalem Ohr Begabte. Von den Angaben der neueren Forscher mögen hier die folgenden erwähnt sein. Es fanden: Appunn (1887/88) 9 bis 12 Schwingungen; Cuperus (1893) mit der Appunnschen Lamelle 10 bis 13; van Schaik (1895) und Batelli (1897) 24; Bezold mit Laufgewichtgabeln 11 bis 12.

Die Mehrzahl dieser Untersuchungen ist deswegen ziemlich wertlos, weil dabei eine wichtige Fehlerquelle, nämlich die Mitwirkung von Obertönen, nicht genügend berücksichtigt worden ist. Man darf mit Bestimmtheit behaupten, daß keine der gegenwärtig üblichen Tonquellen absolut reine, einfache Töne hervorbringt. Von den Saiten und Zungen ist es allgemein bekannt, daß ihre Grundtöne Obertöne haben. Ebenso kann kein Zweifel mehr darüber herrschen, daß die Orgelpfeifen Obertöne geben, obschon dieselben bei zweckmäßiger Mensur und Intonation schwach und an Zahl gering sind. Bezüglich der Stimmgabeln meinte man früher, sie seien ohne Obertöne, bis Quincke, Stefan, Preyer u. a. das Irrtümliche dieser Ansicht nachwiesen [1]). Auch Helmholtz hat dieselbe ursprünglich vertreten, hörte aber später bei einer stark schwingenden Gabel von 64 Schwingungen mit geeigneten Resonatoren die Obertöne bis zum fünften. Ich selbst habe noch beim Zusammenklingen zweier Edelmannscher Laufgewichtgabeln, von denen die eine 24, die andere 26 Schwingungen machte, gleichzeitig Schwebungen von verschiedener Frequenz beobachtet, was nur auf der Mitwirkung von Obertönen beruhen konnte. Die dem Grundton der Gabeln zunächst liegenden Obertöne werden nicht unmittelbar durch die Schwingungen der Gabelzinken hervorgerufen [2]), sondern entstehen erst in der umgebenden Luft durch gewisse physikalische Vorgänge, die wiederholt, neuerdings besonders eingehend von Lindig [3]), untersucht sind. Von der Appunnschen Lamelle gilt Ähnliches wie von den Gabeln. Auch ihr Klang ist nicht obertonrein, wie van Schaik [4])

---

[1]) Vgl. C. Stumpf, Wiedemanns Ann. **57**, 673; 1896. — [2]) Mit Rücksicht hierauf darf man weder, wie Bezold (Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane **13**, 162, 1897) wollte, aus der von der Gabelzinke aufgezeichneten Kurve auf die Abwesenheit aller Obertöne schließen, noch glauben, daß der Gabelton durch Überstreifen von Gummiringen über die Zinken gänzlich obertonfrei werde. — [3]) Ann. d. Phys. u. Chem. **11** (4), 31 ff., 1903. (Daselbst auch die ältere Literatur.) — [4]) Arch. Néerlandaises **29**, 87; Naturw. Rundsch. **10**, 93—94, 1895.

gezeigt hat. Wird aber der Grundton von Obertönen begleitet, so ist man bei der Ermittelung des tiefsten hörbaren Tones ganz auf die Fähigkeit des Ohres angewiesen, den Grundton aus dem Gesamtklange herauszuhören und so seine isolierte Beobachtung zu ermöglichen. Nun sind wir ja allerdings imstande, im allgemeinen die Teiltöne eines Klanges gesondert wahrzunehmen. Aber diese Analyse gelingt nicht jedem und nicht immer mit gleicher Leichtigkeit, und gerade im vorliegenden Falle ist sie besonders schwierig. Die relativ hohen und hellen Obertöne, die beispielsweise beim unzweckmäßigen Anschlagen der Stimmgabeln entstehen, wird man wohl regelmäßig bemerken (und dann durch Dämpfung beseitigen können), nicht jedoch die Oktave, Duodezime und Doppeloktave des Grundtones, auf die es hier in erster Linie ankommt. Töne, die wie Grundton und Oktave im Verhältnis 1 : 2 oder wie erster und zweiter Oberton im Verhältnis 2 : 3 zueinander stehen, unterliegen nämlich einer beträchtlichen Verschmelzung, wie Stumpf[1]) experimentell festgestellt hat. Dabei bezogen sich seine Beobachtungen auf die mittleren Oktaven der Tonreihe, also eine dem Ohre vertraute Region, und man wird wohl nicht irren, wenn man annimmt, daß die Urteilsfähigkeit des Gehörs in dieser Hinsicht gegenüber den ungewohnten und schwachen tiefsten Tönen noch viel unzuverlässiger ist; lassen uns doch auch Intervallsinn und Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit um so mehr im Stich, je mehr sich die Töne der Hörgrenze nähern. Hierzu kommt noch ein Zweites. In Klängen von mittlerer und hoher Tonlage überwiegt der Grundton die Obertöne bei weitem an Stärke, was das Heraushören desselben wesentlich erleichtert. Bei Klängen von großer Tiefe dagegen findet sich, wie Helmholtz[2]) durch Versuche mit seiner bekannten Doppelsirene nachwies, das umgekehrte Verhältnis, so daß hier die Obertöne den Grundton mehr oder weniger verdecken. Beide Umstände, Verschmelzung und Verdeckung, erschweren die richtige Beurteilung der tiefsten Klänge in solchem Grade, daß man keine sichere Gewähr dafür hat, ob die jeweils tiefste Tonempfindung wirklich von dem Grundton herrührt oder von einem Oberton oder von dem unanalysierbaren Zusammenklang mehrerer Obertöne des an sich unhörbaren Grundtones.

Eine Beseitigung der Obertöne wäre also mehr als wünschenswert. Hat man es mit höheren Tönen zu tun, so kann man bekanntlich dieses Ziel durch das relativ einfache Mittel der Interferenz erreichen. Den tiefen Tönen gegenüber läßt sich aber diese Methode nicht anwenden, weil dadurch die ohnehin so leisen Grundtöne mit ausgelöscht werden würden. Preyer hat es versucht, die Intensität der tiefsten Töne durch Resonatoren zu steigern, aber man wird nicht daran denken dürfen, etwa auf diese Weise die Grundtöne von den Obertönen zu trennen, denn die letzteren werden ebenfalls von allen Resonatoren mehr oder weniger erheblich verstärkt. Der einzige mir bekannte sachgemäße Versuch, einen möglichst tiefen Ton ohne harmonische Obertöne zu erzeugen, ist von Helmholtz[3]) bei seinen Beobachtungen über die untere Hörgrenze angestellt worden. Er belastete Saiten mit Metallstücken, so daß sie beim Anschlagen nur hohe unharmonische Obertöne gaben, die mit dem Grundton nicht verwechselt werden konnten. Aber dieses

[1]) Beiträge z. Akustik u. Musikwiss. 1, 36, 1898. (Daselbst auch d. ältere Literatur.) — [2]) Lehre v. d. Tonempf. (5), S. 291, 1896. — [3]) Ebenda, S. 294.

Verfahren hatte wieder den Übelstand, daß die Grundtöne für den beabsichtigten Zweck zu schwach waren.

Es scheint also einstweilen nicht möglich, bei der Bestimmung des tiefsten hörbaren Tones die Obertöne ganz unschädlich zu machen. Unter diesen Umständen ist die folgende Beobachtung von A. J. Ellis[1]) von großer Wichtigkeit. Derselbe konstatierte, an einem ebensolchen Zungenapparat experimentierend, wie ihn Preyer für seine eigenen Versuche hatte verfertigen lassen, daß die Zungen 21 und 25 — die Ziffern bedeuten die Schwingungszahlen — vier Schwebungen pro Sekunde gaben und ebenso alle nach unten folgenden Paare um je vier Schwingungen differierender Zungen bis hinab zu 15 und 19. Der Befund, daß die 15 Schwingungen mit den 19 Schwingungen vier Schwebungen machten, beweist, seine Richtigkeit in allen Stücken vorausgesetzt, daß wirklich die Grundtöne perzipiert wurden, daß also 15 Pendelschwingungen pro Sekunde noch eine physiologische Wirkung im Ohre hervorrufen können.

Wie es sich in dieser Beziehung mit noch langsameren Schwingungen verhält, bleibt unentschieden. Schwebungen sind unterhalb 15 Schwingungen bisher nicht gehört worden. Es ist aber möglich, daß noch tiefere Töne den Hörnerven zu erregen vermögen, wenn nur ihre Schwingungsweite groß genug ist. Die tiefsten Töne haben nämlich eine um so geringere subjektive Intensität, je näher man der Grenze kommt, und damit sie überhaupt wahrnehmbar werden, muß ihre Amplitude mit abnehmender Schwingungszahl in immer stärkerem Grade wachsen.

Es läßt sich also keine ganz bestimmte Tonhöhe als untere Grenze angeben. Überdies kommen nicht unerhebliche individuelle Unterschiede in bezug auf die Perzeptionsfähigkeit für tiefste Töne vor. Auf diese Tatsache hat schon Preyer ausdrücklich aufmerksam gemacht, und sie ist seitdem öfter bestätigt. Auch mit dem momentanen Grade der Aufmerksamkeit des Hörenden und mit dessen Übung variiert die untere Hörgrenze, wovon ich mich gelegentlich in Gemeinschaft mit O. Abraham beim Heraushören von tiefsten objektiven Tönen aus einem Klanggemisch überzeugen konnte. Vor allem aber muß hervorgehoben werden, daß es auch für den Geübten nicht leicht ist, einen markanten Punkt anzugeben, bei dem die Tonempfindung aufhört, wenn ihm nacheinander tiefer und tiefer werdende Töne vorgeführt werden. Unterhalb 40 Schwingungen verlieren die Töne ihren musikalischen Charakter, sie werden immer leiser, dumpfer und zunehmend rauher, diskontinuierlicher. In der Nähe der Hörgrenze findet sich eine Region, wo neben deutlich getrennten Tonstößen die eigentliche Tonempfindung nur noch schwach, gleichsam verschwimmend vorhanden ist, und schließlich lösen sich die Töne für die meisten ganz in einzelne sehr tiefe, weiche, hauchende Stöße auf, die zuweilen von Nebengeräuschen und sehr häufig von flatternden Tastempfindungen begleitet sind. Letztere können so lebhaft auftreten, daß es zweifelhaft wird, ob man die einzelnen Tonstöße mehr hört oder mehr fühlt.

Jene älteren Autoren, die sich um die Feststellung des physiologisch tiefsten Tones bemüht haben, versuchten auch schon die obere Hörgrenze zu ermitteln. So haben Sauveur, Chladni, Biot und Wollaston Angaben

[1]) W. Preyer, Akust. Untersuch., Jena 1879, S. 6 ff.

über die Höhe des höchsten noch wahrzunehmenden Tones gemacht. Ihre Zahlen schwanken jedoch zwischen 6400 und etwa 20000 und beruhen auf so ungenauen Berechnungen, daß sie keinen positiven Wert besitzen.

Erst Savart (1830) verdanken wir exaktere Bestimmungen. Mit seinem Zahnrade, dessen Zähne gegen ein Kartenblatt schlugen, erhielt er Töne von etwa 24000 Schwingungen, die er deutlich hörte. Preyer[1]) benutzte statt der Zahnradsirene eine Löchersirene nach Art der Seebeckschen, längs deren Peripherie in immer gleichem Abstande voneinander 1024 Löcher gebohrt waren. Geschah die Umdrehung so rasch, daß etwa 16000 Löcher in der Sekunde den anblasenden Luftstrom passierten, so entstand ein noch vollkommen klarer Ton. Preyer selbst konnte sogar gleich Savart noch bei 24000 Luftstößen einen ganz leisen, sehr hohen Ton aus dem Blasegeräusch heraushören. Die Schwingungszahl des Grundtones ist bei derartigen Sirenenversuchen einfach gleich dem Produkt aus der Zahl der Zähne oder Löcher und der Anzahl der Umdrehungen in einer Sekunde; die Obertöne der höchsten Grundtöne kommen natürlich, als jenseits der Grenze liegend, überhaupt nicht in Betracht. Pauchon[2]) benutzte eine kräftige Dampfsirene nach Cagniard de la Tour. Wechselte der Dampfdruck im Windkessel von 0,5 bis 1,5 Atmosphären, so lag die Grenze zwischen 24000 und 30000 Schwingungen, während bei Anwendung einer Gegenplatte die Tonhöhe unter einem Druck von 2,5 Atmosphären auf 36000 stieg, ohne daß damit die Hörgrenze erreicht war.

Außer dem Zahnrade verwendete Savart auch Glas- und Stahlstäbe, die 16000 Schwingungen als mittleren Grenzwert ergaben. Preyer wiederholte diese Versuche mit den bekannten Klangstäben von R. Koenig. Die Töne der Stäbe mi^8 (e^6), sol^8 (g^6) und ut^9 (c^7) wurden als unangenehm schneidend empfunden. Das Anschlagen des nächst höheren Stabes mi^9 (e^7) rief aber nur noch eine kurze, schwache Tonwahrnehmung hervor, und jenseits mi^9, bei sol^9 und ut^{10} war überhaupt kein Ton mehr zu hören; doch meint Preyer, daß bei genügender Steigerung der Intensität c^8 wohl noch vernehmbar sein würde. Seitdem sind, namentlich in neuester Zeit, die Klangstäbe wiederholt zu Beobachtungen über die obere Hörgrenze benutzt worden, wobei man in Übereinstimmung mit Preyer als durchschnittlich höchsten Ton mi^9 gefunden hat.

Hinsichtlich der physikalischen Tonhöhenbestimmung bieten die transversal schwingenden Klangstäbe den Vorteil, daß ihre Schwingungszahlen sich theoretisch leicht berechnen lassen. Indessen hat Koenig[3]) vor einigen Jahren auf Grund von Kontrollversuchen, zu denen er die Differenztöne der Klangstäbe benutzte, angegeben, daß die wirkliche Tonhöhe hinter der berechneten um so mehr zurückbleibe, je höher der Ton werde, und daß die Töne der von ihm seither verfertigten Stäbe zwischen c^7 und g^7 reichlich einen Halbton zu tief sein dürften. Dem entspricht die Mitteilung Schwendts[4]), der die Schwingungszahlen der Koenigschen Klangstäbe nach der Kundtschen Staubfigurenmethode prüfte, daß sein Exemplar des Klangstabes mi^9

---

[1]) Grenzen der Tonwahrnehmung, S. 18 ff., Jena 1876. (Ebenda auch die ältere Literatur.) — [2]) Compt. rend. **96**, 1041; Philos. Mag. **15** (5), 371. — [3]) Wiedemanns Ann. **69**, 721 ff., 1899. — [4]) Pflügers Archiv **75**, 356.

mehr ein d^7 als ein e^7 sei, während die Stimmung der Stäbe bis zum c^7 hinauf sich als richtig erwiesen habe.

Preyer benutzte auch Stimmgabeln zur Ermittelung der oberen Hörgrenze, wie vor ihm (1845) schon Despretz. Allein die Resultate, die damit erzielt wurden, sind nicht brauchbar. Denn sowohl Despretz' Mechaniker Marloye als auch Appunn, von dem Preyer sein Instrumentarium bezog, haben die Tonhöhen ihrer Gabeln nur nach dem musikalischen Gehör abgeschätzt, welches, wie man jetzt weiß, den höchsten wie den tiefsten Oktaven gegenüber ganz versagt. In richtiger Erkenntnis dieser Tatsache hat R. Koenig[1]) seine Serien von Gabeln für höchste Töne, welche die diatonische Leiter von c^5 bis f^7 darstellen, stets mittels der Differenztöne gestimmt, und zwar mit tadelloser Genauigkeit, während die wahren Tonhöhen der Appunnschen höchsten Gabeln und Pfeifen von den angeblichen erheblich, ja teilweise um viele Tausende von Schwingungen abweichen. Die nach verschiedenen Methoden angestellten Untersuchungen von Melde, Stumpf und Meyer, Schulze und Schwendt haben dies übereinstimmend gezeigt[2]). Nach Koenigs eigenen mannigfachen Beobachtungen liegt der Ton der Gabel f^7 für die meisten Ohren bereits jenseits der Hörgrenze, „die für bejahrte Leute gewöhnlich bis unter c^7 sinkt". Zu einem ähnlichen Ergebnis sind Schwendt und Wagner[3]) gekommen, die zugleich darauf aufmerksam gemacht haben, daß die Wahrnehmbarkeit der höchsten Gabeltöne auch wesentlich von der Intensität abhängt: damit die betreffenden Gabeln in hörbare Schwingungen geraten, ist ein geschicktes Anstreichen mittels des Bogens erforderlich.

Die Ohrenärzte bedienen sich gegenwärtig zu ihren Untersuchungen über die Perzeption höchster Töne mit Vorliebe einer Pfeife, die, zuerst von Francis Galton[4]) (1876) beschrieben und bald darauf durch Burckhardt-Merian in die otiatrische Praxis eingeführt, neuerdings in wesentlich vervollkommneter Form aus Prof. Edelmanns physikalisch-mechanischem Institut in München als Bestandteil der Bezold-Edelmannschen Kontinuierlichen Tonreihe in den Handel gelangt. Die Konstruktion der Galtonpfeife entspricht dem Zweck, mit einem einzigen Instrument möglichst viele verschieden hohe Töne hervorbringen zu können. Im Innern des zylindrischen Pfeifenkörpers befindet sich ein Stempel, der sich längs einer außen sichtbaren Skala hin und her schrauben läßt, je nachdem man durch Verkürzung des Pfeifenlumens höhere oder durch Verlängerung tiefere Töne erzielen will. Das Anblaserohr, aus welchem der Wind durch einen kreisförmigen Schlitz zum Pfeifenkörper gelangt, steht letzterem konaxial gegenüber. Die Entfernung zwischen beiden, die Maulweite, ist variabel, da sie für verschiedene Tonhöhen verschieden groß sein muß. Um das Anblasen der Pfeife möglichst bequem zu machen, wird jedem Exemplar ein kleiner Gummiballon beigegeben, der durch einen kurzen Schlauch mit dem Anblaserohr verbunden und dann mit der Hand komprimiert wird. Der Tonumfang der Galtonpfeife beginnt in der oberen Hälfte der viergestrichenen Oktave und reicht über die menschliche Hörgrenze hinaus.

[1]) Wiedemanns Ann. **69**, 626 ff. — [2]) Vgl. meine Sammelreferate, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **21**, 141 u. **22**, 229. — [3]) Untersuchungen von Taubstummen. Basel 1899. — [4]) Siehe das Nähere in Francis Galton, Inquiries into Human Faculty and its Development. London 1883.

Bis vor wenigen Jahren konnte man die einzelnen Tonhöhen der Pfeife nur nach mehr oder minder unzuverlässigen Berechnungen und Schätzungen beurteilen, weshalb die aus früherer Zeit stammenden Grenzbestimmungen, wie sie insbesondere von Zwaardemaker und Bezold ausgeführt sind, hier übergangen werden dürfen. Ein wesentlicher Fortschritt wurde erst gemacht, als Stumpf und Meyer mittels ihrer „Differenztonmethode" eine Aichung der Pfeife ermöglichten [1]) und später von Schwendt sowie gleich darauf von F. A. Schulze gezeigt ward, daß sich die Kundtsche Staubfigurenmethode [2]) mit bestem Erfolge auch auf die Galtonpfeife anwenden läßt. Auf Grund seiner nach diesem Verfahren angestellten Versuche hat Schwendt angegeben, daß die obere Hörgrenze für die Galtonpfeife noch ungefähr eine Oktave höher liege als für die Koenigschen Gabeln. Stumpf und Meyer fanden die Grenze bei etwa 20000 Schwingungen für die von ihnen benutzten Pfeifen, während Edelmann (im Jahre 1900) behauptet hat, mit verbesserten Pfeifen ließen sich noch hörbare Töne von 50000 Schwingungen erzielen.

Es wäre wünschenswert, daß die Untersuchungen über die höchsten hörbaren Galtontöne in größerem Umfange wiederholt würden, wobei dann folgende Punkte berücksichtigt werden müßten. Der vorhin erwähnte Gummiballon ist durchaus unbrauchbar, insofern er nicht nur einen von Fall zu Fall in unberechenbarer Weise wechselnden Winddruck liefert, sondern auch, wie Stumpf und Meyer fanden, einen Ton gibt, dessen Höhe sich trotz seiner kurzen Dauer fortwährend und beträchtlich ändert. Für exakte physiologische Bestimmungen muß man sich also eines möglichst gleichmäßig funktionierenden Gebläses bedienen. Da sich aber auch mit einem solchen kaum zu allen Zeiten genau der gleiche Druck erzielen läßt und die Tonhöhe außer von der Stellung des Stempels im Pfeifenrohr und der Maulweite auch von der Beschaffenheit der Luft und von der Windstärke abhängt, so erscheint es nötig, jedesmal während der Beobachtung eines Galtontones seitens der Versuchsperson gleichzeitig die Staubfigur herzustellen. Schließlich ist noch hervorzuheben, daß die Galtonpfeifen häufig in der Nähe der Grenzlage neben den höchsten auch wieder tiefere Töne hören lassen. Inwieweit durch diesen Umstand Irrtümer in der Bestimmung des höchsten wahrnehmbaren Tones entstehen und wie dieselben etwa vermieden werden können, wird erst durch weitere Untersuchungen über die betreffenden Eigentümlichkeiten der Pfeifen und das Verhalten der Kundtschen Röhren gegenüber Tongemischen zu entscheiden sein [3]).

Jedenfalls ist die physikalische Reihe der verschieden hohen Töne weit länger als die physiologische. So hat R. Koenig Stimmgabeln von 90000 Schwingungen verfertigt und Edelmann ist mit Galtonpfeifchen von sehr kleinen Dimensionen sogar bis zu 170000 Schwingungen gelangt, wobei beide die Existenz dieser nicht mehr hörbaren Töne mit Hilfe der Staubfigurenmethode nachwiesen.

---

[1]) Wiedemanns Ann. **61**, 1897. — [2]) Genauere Informationen über die Technik derselben nebst weiteren Literaturangaben enthalten die Arbeiten von F. A. Schulze und R. Koenig in Wiedemanns Ann. **68** u. **69** (1899). — [3]) Vgl. hierzu Ch. S. Myers, Journ. of Physiol. **28**, 417 ff., 1902.

b) Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen.

Physikalisch bedeutet jede beliebig kleine Veränderung der Schwingungszahl eine Erhöhung oder Vertiefung des Tones, nicht jedoch für das Ohr. Solange nicht die Differenz der Schwingungszahlen zweier Töne ein gewisses Minimum überschreitet, erscheinen beide Töne in der Empfindung gleich. Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen hat also eine Grenze.

Wie Preyer[1]) berichtet, war Delezenne (1826) der erste, der die kleinste noch wahrnehmbare Differenz zweier Tonhöhen zu bestimmen suchte. Er bediente sich hierzu einer metallenen Saite, die 120 Doppelschwingungen in der Sekunde machte. Wurde dieselbe durch einen Steg so in zwei Teile geteilt, daß der Steg 1 mm von der genauen Mitte entfernt war, so erschien für sehr geübte Ohren der Ton der einen Saitenhälfte bereits merklich verschieden von dem der anderen. Bei dieser Beobachtung, die Preyer (gleich anderen) irrtümlich interpretierte, betrug nach Stumpfs[2]) Berechnung der Tonhöhenunterschied 0,8 Schwingungen. Seebeck (1846) bemerkte im Verein mit zwei anderen musikalischen Personen jedesmal den Unterschied zwischen zwei Stimmgabeln, von denen die eine 439,636 und die andere 440 Schwingungen in der Sekunde vollführte. Abgesehen von diesen beiden und einigen weiteren, zum Teil nicht eindeutigen, Angaben ist seitens der älteren Forscher kein Material zur Beantwortung der Frage nach der Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit gesammelt worden.

Erst Preyer selbst hat systematische Versuche angestellt. Der speziell hierfür von Appunn in Hanau gebaute Tondifferenzapparat war einer jener Zungenkasten, welche die genannte Instrumentenfirma zu verschiedenen Zwecken für mehrere Akustiker verfertigt hat und deren Konstruktionsprinzip das folgende ist. Eine Reihe von Metallzungen sind in horizontaler Lage nebeneinander im Innern eines Kastens angebracht, dessen oberer hohler Teil von einem Blasebalge aus mit Druckluft gefüllt wird. Zu jeder Zunge gehört ein Ventilschieber. Wird derselbe herausgezogen, so kann die Preßluft an der Zunge vorbeistreichen und setzt sie in Bewegung; wird er zurückgeschoben, so erlischt der Ton momentan. Dank der Wahl dieser Einrichtung erhielt Preyer Töne, die einander an Intensität und Klangfarbe genügend gleich waren. Es war nur nötig, die von der Versuchsperson zu vergleichenden zwei Töne hinsichtlich ihrer Dauer und der Zwischenpause genau zu regulieren sowie von Zeit zu Zeit die Schwingungszahlen durch Zählung der Schwebungen einer Kontrolle zu unterziehen. Durch mehr als 1000 Einzelversuche überzeugte sich Preyer davon, daß musikalische und äußerst geübte Beobachter zwei Zungentöne von 500,0 bzw. 500,3 Schwingungen wie auch die Tonhöhen 1000,0 und 1000,5 stets als verschieden beurteilten, während eine Differenz von 0,2 nie sicher erkennbar war. Mit Hinzunahme der Bestimmungen von Delezenne und Seebeck ergab sich hieraus, daß innerhalb der drei Oktaven von c^0 bis c^3 die eben merkliche Differenz zweier Schwingungszahlen $n_1 - n = d$ und also auch die absolute Unterschieds-

[1]) Grenzen der Tonwahrnehmung, S. 26 ff. Jena 1876. (Daselbst auch die Zitate der älteren Arbeiten.) — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **18**, 373, 1898.

empfindlichkeit $\frac{1}{d}$ so gut wie konstant ist, die relative Unterschiedsempfindlichkeit $n:d$ aber nicht.

Die Verwendung von Stimmgabeln zur Ermittelung der Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit hat den Nachteil, daß es nicht leicht ist, Stärkeunterschiede der Klänge zu verhüten. Trotzdem erhielt Luft[1]) mit Gabeln auf Resonanzkasten Ergebnisse, die mit denen Preyers im wesentlichen übereinstimmen. Er fand als Unterschiedsschwelle für C 0,149; für c^0 0,159; für c^1 0,232; für c^2 0,251; für c^3 0,218 und für c^4 0,362. Daß seine Zahlen kleiner sind als die der früheren Autoren, hat wohl in dem relativ bequemen Versuchsmodus seinen Grund. Es wurde nämlich dem Urteilenden jedesmal vorher mitgeteilt, in welcher Richtung die Tonveränderung stattfinden würde, und er hatte nur anzugeben, bei welchem Versuche er einen Unterschied bemerkte. So ließ Luft, wie übrigens auch Preyer, seine Versuchspersonen nur über Gleichheit oder Ungleichheit der Tonhöhen entscheiden. Da diese Methode nicht ganz einwandfrei ist, so hat M. Meyer[2]) die Aufgabe schärfer dahin formuliert, daß nicht bloß die Existenz, sondern auch die Art des Unterschiedes von dem Beobachter festzustellen sei. Dabei erhielt er etwas größere, aber auch zuverlässigere Werte. Von der Hauptversuchsperson, C. Stumpf, wurde nachstehende Tabelle gewonnen, deren oberste Horizontalreihe die Tonhöhen der Versuchsgabeln angibt und die im übrigen in Prozentzahlen die richtigen Urteile über die Frage, welcher Ton der höhere war, enthält.

Verstimmung	100	200	400	600	1200
0,35	71	83	80	84	67
0,65	74	91	92	90	70

Sehr hohen und sehr tiefen Tönen gegenüber ist die Unterschiedsempfindlichkeit geringer und nimmt mit wachsender Annäherung an die Enden der Tonreihe immer mehr ab; namentlich gilt dies von der oberen Hörgrenze. An genaueren, zahlenmäßigen Feststellungen hierüber fehlt es indessen noch fast ganz. Erwähnenswert ist die Bemerkung Preyers, daß auch Geübte sich bei den Tönen unterhalb 40 Schwingungen um eine ganze Schwingung irren, und die Angabe Lufts, daß sich für ihn selbst bei Benutzung einer Gabel von 32 Schwingungen die Differenz 0,44 als Schwelle ergeben habe. Ungeübte, mögen sie auch musikalisch sein, pflegen in dieser tiefen Region Fehler von mehreren Schwingungen zu begehen, zumal wenn man Gabeln als Schallquellen wählt. Klaviertöne sind hinsichtlich der Höhenunterschiede der Intervalle leichter zu beurteilen, wahrscheinlich weil sie obertonreicher sind und ihre Klangfarbe uns vertrauter ist. Jedenfalls spielen Übung und Beobachtungsgabe immer eine wichtige Rolle, wo es sich um die Erkennung von minimalen Tonhöhendifferenzen handelt. Eine Unterschiedsempfindlichkeit von solcher Feinheit, daß eine Veränderung des Tones um

[1]) Wundts Philos. Stud. **4**, 511 ff., 1888. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **16**, 352 ff., 1898.

weniger als eine halbe Schwingung bemerkt wird, ist keineswegs jedem an und für sich eigen, sondern ein Optimum, das manche durch längere Beschäftigung mit Tönen zu erreichen vermögen, hinter dem aber die durchschnittliche Leistungsfähigkeit des menschlichen Ohres nicht unbeträchtlich zurückbleibt. Findet man doch, wie Stumpf[1]) mitteilt, nicht so selten Personen, die die Frage, welcher von zwei Tönen der höhere sei, selbst dann unrichtig beantworten, wenn das Intervall eine Terz, eine Quarte oder gar eine Quinte beträgt. Stumpf erhielt bei mehreren Versuchsreihen dieser Art im Mittel auf je vier Urteile nur drei zutreffende. Eine Dame erklärte sogar g^2 für höher als f^4.

c) Die Tonfarbe.

Wir pflegen uns die Tonempfindungen in Form einer Reihe zu vergegenwärtigen, die mit der tiefsten beginnt und mit der höchsten endet, während dazwischen die übrigen nach wachsender Schwingungszahl eingeordnet sind. Das stetige Zunehmen der Tonhöhe mit der Frequenz der Schwingungen ist wohl die wesentlichste Veranlassung hierzu, aber nicht die einzige. Es gibt noch andere Merkmale der Tonempfindungen, die sich zugleich mit der Höhe kontinuierlich verändern.

In dieser Beziehung sei zunächst der größeren oder geringeren Helligkeit gedacht, die wir den Toneindrücken zuschreiben. Die tieferen Töne haben einen dumpfen, dunkeln Charakter, die höheren erscheinen hell. Der Unterschied tritt besonders klar hervor, wenn man Töne der tiefsten Oktave mit solchen aus der höchsten Region vergleicht, weniger deutlich bei mittleren Tönen. Er beruht zum Teil auf naheliegenden Assoziationen; zum Teil ist er aber auch in der Qualität der Empfindungen selbst begründet, wie daraus hervorgeht, daß kleine Kinder, die weder die Ausdrücke „hoch“ und „tief“ kennen, noch sonst musikalische Anlagen besitzen, zuweilen von selbst auf die Bezeichnungen „dumpf“, „dunkel“ oder „hell“ zur Unterscheidung von Tönen verfallen[2]).

Neben seiner Dunkelheit oder Helligkeit ist dem empfundenen Tone eine gewisse Größe eigen. Die tiefen Töne haben etwas Massiges, Gewaltiges, Kopf und Körper des Hörers Umflutendes, während man den höchsten Prädikate wie „dünn“, „fadenförmig“, „spitzig“, „winzig“ beizulegen pflegt. Von den Griechen wurde dieses Verhältnis geradezu zur Klassifizierung der Töne benutzt, indem sie nicht wie wir von hohen und tiefen, sondern von scharfen (spitzen) und schweren Tönen sprachen. Die von jedem leicht zu machende Beobachtung, daß die tiefen Töne von umfangreichen Instrumenten ausgehen, deren Schwingungen oft nicht nur gehört, sondern auch als Erzitterungen gefühlt werden und lange nachhallen, daß die großen Tiere eine tiefe, die kleinen eine hohe Stimme haben, und ähnliche Erfahrungen tragen gewiß dazu bei, die Vorstellung einer Ausdehnung mit den Tönen zu verknüpfen. Aber abgesehen hiervon kommt, wie Stumpf in seiner Tonpsychologie überzeugend nachgewiesen hat, der Tonempfindung eine gewisse Größe als immanente Eigentümlichkeit zu, obgleich sich diese Größe mit dem Begriff einer räumlichen Eigenschaft im gewöhnlichen optischen oder haptischen Sinne nicht vollkommen deckt.

[1]) Tonpsychologie 1, § 14, 1883. — [2]) Stumpf, Tonpsychologie 2, 531.

Wenn wir die tiefen Töne als weich, die hohen als scharf bezeichnen, so hängt auch dies teilweise mit der Extensität der Töne zusammen. Alles Weiche hat eine gewisse Breite, während die „Schärfe" an die längliche, dünn geschliffene Messerklinge erinnert. Der ausschlaggebende Grund für die Wahl dieser Prädikate dürfte aber der sein, daß die höheren Töne eine relativ größere Empfindungsintensität besitzen als die tieferen. Diese Tatsache ist schon Descartes und Chladni aufgefallen. Später hat dann Helmholtz[1]) im Gegensatz zu der von anderen Akustikern ausgesprochenen Voraussetzung, die Stärke der Töne verschiedener Höhe sei unter übrigens gleichen Umständen der lebendigen Kraft der Luftbewegung direkt proportional, durch einen einfachen Versuch mit seiner Doppelsirene gezeigt, daß, wenn die gleiche mechanische Arbeit aufgewendet wird, um tiefe oder hohe Töne bei sonst identischen Bedingungen zu erzeugen, letztere die ersteren hinsichtlich ihrer subjektiven Stärke außerordentlich übertreffen. Die Zunahme der Tonstärke mit der Tonhöhe erwies sich besonders bedeutend in der tiefsten Region der Skala und ließ sich bis zum a^2 verfolgen. Da die lebendige Energie oder, was dasselbe bedeutet, die mechanische Arbeit proportional $(an)^2$ ist, wenn a die Amplitude und n die Schwingungszahl bezeichnet, so nimmt bei gleich bleibender Energie und wachsender Tonhöhe a in demselben Maße ab, wie n zunimmt. Die Helmholtzsche Beobachtung beweist also, daß von zwei verschiedenen Tönen, die die gleiche Amplitude haben, der höhere der lautere ist, und daß die Amplitude des höheren bis zu einem mit der Höhe variierenden Grade kleiner werden kann als die des anderen, ehe ersterer sein Übergewicht an Empfindungsstärke einbüßt. Die von Bosanquet[2]) experimentell begründete Theorie, daß zwei verschieden hohe Töne der mittleren Oktaven gleich laut erscheinen, wenn die Arbeit der Wellenlänge proportional ist, kommt auf dasselbe hinaus und desgleichen das Resultat einer Untersuchung von Charpentier[3]), der, wie vor ihm gelegentlich schon R. Koenig, konstatierte, daß Töne zwischen f^0 und f^3, denen man bei ihrer Erregung gleiche Schwingungsweiten gibt, in um so größerem Abstande hörbar sind, je höher die Schwingungszahl ist. Auch Max Wien hat Versuche über die Beziehungen zwischen Tonhöhe und Empfindlichkeit des Ohres angestellt, wozu er Telephone benutzte. Er fand[4]), daß die Telephonströme für die tiefen Töne verhältnismäßig stark sein müssen, damit ein eben noch merklicher Ton entsteht. Die Empfindlichkeit steigt dann rasch mit der Tonhöhe, erreicht in der Gegend von 1000 bis 5000 Schwingungen ein Maximum und nimmt weiter aufwärts wieder ab. Zwischen diesen Beobachtungen und gewissen Erfahrungen des täglichen Lebens, wie der, daß man Donner und Kanonenschüsse noch in sehr großen Entfernungen hört, daß tiefe Glockentöne weiter dringen als hohe, selbst wenn sie in der Nähe für gleich laut gehalten werden, oder daß Pauke bzw. Kontrabaß die ersten Instrumente sind, die bei der Annäherung an ein fernes Orchester vernehmbar werden, besteht zwar dem Anscheine nach ein Widerspruch, aber derselbe dürfte sich wohl bei genaueren Untersuchungen eben als ein nur scheinbarer herausstellen.

---

[1]) Lehre von den Tonempfindungen (5), 290. — [2]) Philos. Mag. (4), **44**, 381, 1872. — [3]) Arch. de Physiol. norm. et path. 1890, p. 496. — [4]) Pflügers Arch. **97** (1903).

Die großen Stimmgabeln für die tiefsten Töne müssen unmittelbar ans Ohr gehalten werden, sonst bleibt der akustische Effekt trotz der beträchtlichen, mehrere Millimeter betragenden Amplitude gleich Null, während bei den Gabeln für sehr hohe Töne ein verhältnismäßig schwacher Anstoß genügt, um einen im ganzen Zimmer hörbaren Ton hervorzurufen. Die Perzeption der sehr hohen Töne ist sogar, wenn die Gabeln stark gestrichen werden, geradezu schmerzhaft und mit mancherlei unangenehmen Nebenempfindungen verknüpft. Preyer[1]) hat einige interessante Beobachtungen hierüber mitgeteilt, deren Richtigkeit ich an verschiedenen Personen bestätigt gefunden habe. Es stellt sich bei vielen ein Gefühl ein, als würden die Trommelfelle nach innen gezogen oder mit einer feinen Nadel gestochen. Einige haben eine Empfindung, wie wenn ihnen ein dünner Faden durch den Kopf gezogen würde; auch treten zuweilen eigentümliche Sensationen in der Haut des Rückens auf. Den der Grenze nahen höchsten Tönen der Galtonpfeife ist wieder eine geringere Stärke eigen, ob aus physiologischen oder physikalischen Gründen, muß einstweilen dahingestellt bleiben. Sie erregen kaum Schmerz, aber häufig Unlustgefühle. Der musikalische Charakter geht ihnen völlig ab, man ist vielmehr eher geneigt, sie mit Geräuschen zu vergleichen. Bei zunehmender Verkürzung des Pfeifenrohres werden sie merklich leiser, winziger und spitzer, schließlich gleichsam punktförmig, während der Eindruck eines entsprechenden Höherwerdens fehlt. Die Veränderung des Intensiven und Extensiven in der Empfindung überwiegt hier also die des rein Qualitativen.

Die drei mit der Höhe stetig sich verändernden Merkmale der Tonempfindung, Helligkeit, Größe und Stärke, hat Stumpf in den Begriff Tonfarbe zusammengefaßt[2]). Die Tonfarbe ist für den einfachen Ton das, was wir beim Zusammenklingen eines Grundtones mit seinen Obertönen als Klangfarbe bezeichnen. Freilich existiert, wie schon hervorgehoben wurde, kein Instrument, das ganz reine Grundtöne gibt, aber die Fähigkeit unseres Ohres, Klänge in ihre Bestandteile, die Teiltöne, zu zerlegen, setzt uns in den Stand, jederzeit aus einem Tongemenge den einen oder anderen einfachen Ton zu isolieren und seine Farbe zu beurteilen. Übrigens treten in den Klängen der Stimmgabeln und gewisser Orgelpfeifen die Obertöne nach Zahl und Stärke so sehr in den Hintergrund, daß diese Klänge wenigstens für die musikalische Auffassung als einfache Töne gelten und zu Beobachtungen über die Tonfarbe benutzt werden können. Den Ton einer mäßig stark angeschlagenen Gabel aus der mittleren Region der Skala charakterisieren wir durch den Ausdruck „weich“ oder „milde“, wozu die Schwäche der Empfindung Veranlassung gibt. Handelt es sich um einen tiefen Ton, dessen Dunkelheit sich besonders dem Bewußtsein aufdrängt, so nennt man ihn „dumpf“. Die höchsten Töne der Galtonpfeife wird dagegen niemand als dumpf oder weich bezeichnen. Sie erscheinen „hell“ und namentlich, weil das extensive Moment der Empfindung hervortritt, „dünn“. Sind sehr hohe Töne zugleich kräftig, so erhalten sie Prädikate wie „gellend“, „schrill“, „stechend“, „durchdringend“, bei deren Wahl wohl das Auftreten der vorhin beschriebenen unangenehmen Nebenempfindungen mitspricht.

---

[1]) Grenzen d. Tonwahrnehmung S. 21 u. 22. — [2]) Tonpsychol. **2**, § 28.

d) Intensitätsschwelle und Hörschärfeprüfung.

Eine Tonempfindung ist etwas durchaus Einheitliches, nicht weiter in Teile Zerlegbares. Wollen wir indessen zwei Tonempfindungen miteinander vergleichen, so kann es in doppelter Beziehung geschehen, nämlich sowohl hinsichtlich der Qualität (Höhe, Farbe) als auch hinsichtlich der Stärke. Anders ausgedrückt: wir können einen Ton so verändern, daß wir sagen, er habe eine andere Höhe bekommen, aber die Stärke sei dieselbe geblieben, oder so, daß wir sagen, er sei lauter oder leiser, jedoch weder höher noch tiefer geworden. In diesem Sinne ist es zu verstehen, wenn wir an einer Tonempfindung ihre Höhe und ihre Stärke unterscheiden.

Die Stärke der Empfindung eines Tones von bestimmter Schwingungszahl hängt in erster Linie von der Intensität ab, mit welcher der Schallreiz das Ohr trifft, ferner von dem Vorhandensein oder Fehlen anderer gleichzeitiger Gehörseindrücke, von der psychischen Disposition des Hörenden und den funktionellen Verhältnissen des Ohres. Unter der physikalischen Stärke eines Tones verstehen wir bei fortschreitenden Wellen dasjenige Quantum Arbeit, welches in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit geht. Es ist diese Größe $J = \frac{1}{2} \varrho_0 c (2\pi a n)^2$, wenn ϱ_0 die Dichtigkeit des leitenden Mediums, c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles, a die Amplitude und n die Schwingungszahl bedeutet[1]). Der Physiologie des Hörens fällt die Aufgabe zu, unter normalen Bedingungen festzustellen, bei welchem Werte von J bzw. a der Ton von der Höhe n eben hörbar ist und in welcher Weise sich andererseits die Empfindungsstärke dieses Tones mit stetig wachsendem J ändert. Da die Empfindlichkeit des Ohres für verschieden hohe Töne verschieden ist, müssen beide Probleme für die einzelnen Tonhöhen gesondert gelöst werden.

Wenn die Art der Luftbewegung in einer tönenden Pfeife bekannt ist, so läßt sich auf Grund gewisser theoretischer Untersuchungen von Helmholtz auch die Schwingungsweite in demjenigen Abstande von der Schallquelle finden, in welchem das Ohr den Ton eben noch vernimmt. Toepler und Boltzmann[2]) haben eine solche Bestimmung ausgeführt, zu der sie eine gedackte Pfeife von 181 Schwingungen (*fis*^{0}) benutzten. Aus Beobachtungen der stroboskopisch verlangsamten Bewegung eines schwingenden Interferenzstreifens, der dadurch zustande kam, daß ein unterhalb der Decke durch die Pfeife geleiteter Lichtstrahl mit einem außen an der Pfeife vorbeigehenden vereinigt wurde, berechneten sie den Dichtigkeitswechsel der Luft im Knoten der Pfeife und konnten daraus das Schwingungsgesetz für jede beliebige andere Stelle ableiten. Die Pfeife war auf einem freien Platze für ein gutes Ohr unter Berücksichtigung des herrschenden Windes im Mittel 115 m weit hörbar. Die Amplitude betrug in dieser Entfernung 0,00004 mm oder 40 $\mu\mu$; das ist etwa $^1/_{10}$ der Wellenlänge des grünen Lichtes. Da jedoch das Tagesgeräusch der nahen Stadt nicht ganz ausgeschlossen werden konnte, so meinten die Autoren, daß ein feines Ohr zur Nachtzeit gewiß noch viel kleinere Amplituden wahrnehmen würde. In der Tat erhielt Rayleigh[3]), mit einer Pfeife von

---

[1]) Rayleigh, Theorie des Schalles, Braunschweig 1880, § 245. — [2]) Pogg. Ann. 1870, S. 321 ff. — [3]) Proc. Roy. Soc. **26**, 248, 1878.

der Tonhöhe f^4 experimentierend, aus der der Schallquelle zugeführten Energie und der Distanz, in welcher der Ton eben noch ohne Anstrengung zu hören war, als Schwellenamplitude nur $8{,}1 \cdot 10^{-8}$ cm $= 0{,}81\ \mu\mu$. Später [1]) hat er derartige Untersuchungen auch noch mit Stimmgabeln angestellt, wobei das Prinzip des Verfahrens das folgende war. Zunächst wurde die Amplitude der Gabel mikroskopisch beobachtet und, wenn sie bis auf eine gewisse Größe gesunken war, dem in einem bestimmten Abstande befindlichen Mitarbeiter ein Zeichen gegeben, worauf derselbe nach der Uhr die Zeit feststellte, während welcher er den allmählich verklingenden Ton noch hören konnte. Aus dieser Zeitangabe wurde dann theoretisch die Amplitude ermittelt, welche die Gabel in dem Momente, wo der Ton unhörbar ward, besaß, und hieraus wieder die Amplitude, mit der der Ton im Augenblicke des Verschwindens am Trommelfell des Hörers anlangte. Auf diese Weise bekam Rayleigh für die Note c^1 $1{,}27 \cdot 10^{-7}$ cm $= 1{,}27\ \mu\mu$; für g^1 ergibt die Berechnung seiner Daten $0{,}65 \cdot 10^{-7}$ cm $= 0{,}65\ \mu\mu$, für c^2 $0{,}49 \cdot 10^{-7}$ cm $= 0{,}49\ \mu\mu$. Auch Rayleigh betont jedoch, daß alle seine Werte infolge der Vernachlässigung der Energieverluste noch zu groß seien. Den eben erwähnten ganz ähnliche Versuche machte C. K. Wead [2]) mit sechs Stimmgabeln, deren Tonhöhen c^0, c^1, g^1, c^2, g^2 und c^3 waren. Die Ergebnisse wichen, von c^0 und g^2 abgesehen, relativ wenig voneinander ab. Die kleinste Schwellenamplitude, nämlich $7 \cdot 10^{-8}$ cm (nicht $70 \cdot 10^{-8}$ cm, wie a. a. O. irrtümlich angeben ist) oder $0{,}7\ \mu\mu$, erhielt Wead für den Ton c^2.

Diese Resultate — diejenigen anderer Autoren, wie Allard, Stefanini, Zwaardemaker und Quix, können hier ganz übergangen werden — sind insofern nicht völlig einwandfrei, als sie zum Teil auf Annahmen beruhen, deren Berechtigung nicht über jeden Zweifel erhaben ist. Eine Methode, die Minimalamplitude unmittelbar am Ohre zu messen, anstatt sie zu berechnen, wäre daher prinzipiell vorzuziehen. Eine Untersuchung in dieser Richtung hat Max Wien [3]) unternommen. Wird auf die sonst zur Einführung in das Ohr bestimmte Öffnung eines Helmholtzschen Resonators nach passender Erweiterung eine dünne, elastische Metallplatte aufgelötet, deren Eigenton mit dem des Resonators übereinstimmt, so gerät sie bei Erregung des letzteren in relativ beträchtliche Schwingungen. Man kann dieselben meßbar machen, indem man sie in geeigneter Weise von der Platte auf einen Spiegel übertragen läßt. Das Bild eines Spaltes, das der Spiegel in ein Fernrohr wirft, erscheint, durch dieses betrachtet, sobald das System schwingt, nicht als Lichtlinie, sondern als helles Band, und die Breite des Bandes ist der Druckdifferenz bzw. der Amplitude des Tones proportional. Wien konstruierte drei solche „empfindliche" Resonatoren, entsprechend den Tönen a, e^1, a^1. Aus der an dem Lichtbande gemessenen Druckdifferenz im Resonator ließ sich diejenige außen an der Öffnung desselben rechnerisch und experimentell ermitteln, und dann durch Reduktion der Ausschläge des empfindlichen Resonators auf die eines „absoluten" direkt in Quecksilberdruck angeben. So fand Wien, daß für a^1 die größte Druckänderung in jenem Abstande von der

---

[1]) Philos. Mag. (5) **38**, 365 ff., 1894. — [2]) Amer. Journ. of Science (3) **26**, 177 ff., 1883. — [3]) Über die Messung der Tonstärke, Berliner Dissert. 1888 und Wiedemanns Ann. **36**, 834, 1889.

Schallquelle (einem Telephon), in welchem sein Ohr den Ton eben noch wahrnahm, 0,59 $\mu\mu$ Quecksilber betrug und somit die Schwellenamplitude gleich 0,066 $\mu\mu$ war. Vor kurzem [1]) hat er noch weitere Beobachtungen mitgeteilt, die mittels intermittierender Telephontöne gewonnen wurden und unter anderem folgende Tabelle ergaben, in welcher N die Schwingungszahl und J, in Erg ausgedrückt, die zugehörige Schwellenintensität am Ohre bedeutet.

N	J	N	J	N	J
50	$3{,}2 \cdot 10^{-4}$	400	$1{,}6 \cdot 10^{-10}$	3200	$2{,}5 \cdot 10^{-12}$
100	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$	800	$8{,}0 \cdot 10^{-12}$	6400	$8{,}0 \cdot 10^{-12}$
200	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$	1600	$2{,}5 \cdot 10^{-12}$	12800	$9{,}0 \cdot 10^{-11}$

Die hier mitgeteilten Schwellenwerte geben uns ungefähr ein Bild von der durchschnittlichen Empfindlichkeit gut hörender Ohren. Die normale Hörschärfe zeigt gewisse individuelle Schwankungen, was leicht verständlich wird, wenn man bedenkt, daß nicht alle gleich befähigt sind, äußerst schwache Sinneseindrücke zu bemerken, und daß schon kleine Unterschiede in der Struktur oder dem Zusammenhang der einzelnen Teile des Gehörorganes Differenzen in der Wahrnehmung bedingen können. Gibt es doch genug Personen, die mit dem einen Ohr schärfer hören als mit dem anderen, ohne daß sich hierfür ein besonderer Grund, etwa eine frühere Erkrankung oder eine störende Ansammlung von Cerumen, nachweisen ließe; gleichwie ja auch die meisten Menschen eine Verschiedenheit der Tonhöhe wahrnehmen, wenn der nämliche objektive Ton erst dem einen und dann dem anderen Ohre dargeboten wird.

Die Ohrenärzte haben zuweilen Gelegenheit, eine Steigerung der Hörschärfe über die Norm zu konstatieren. So hören Patienten mit Facialislähmung, wenn der den Steigbügelmuskel versorgende Zweig mit ergriffen ist, tiefe Töne auf eine größere Distanz als Gesunde. Auch bei Erkrankungen des Labyrinthes, des *Nervus acusticus* und des Zentralorganes, z. B. nach Sonnenstich oder im Verlaufe meningitischer Reizzustände, kommt es vor, daß Töne und Geräusche außerordentlich verstärkt vernommen werden. In der Regel sind dabei die Schallempfindungen zugleich unangenehm, peinigend oder direkt schmerzhaft. Beide Symptome, die Steigerung der Hörschärfe und die Schmerzempfindlichkeit, werden in der otiatrischen Literatur meistens in den Begriff der Hyperästhesie zusammengefaßt. Vom physiologischen Standpunkte aus dürfte es sich aber empfehlen, die erstere als Hyperacusis von der letzteren als eigentlicher *Hyperaesthesia acustica* zu unterscheiden. Die Hyperakusie kann ihren Grund entweder in der Insuffizienz der normalen Dämpfungsvorrichtungen im Ohre haben oder in einer pathologisch erhöhten Erregbarkeit der schallleitenden Nervenbahnen. Die Hyperästhesie ihrerseits ist keineswegs an eine Steigerung der Hörschärfe gebunden. Sie ist vielmehr wiederholt bei Schwerhörigkeit und totaler Taubheit beobachtet worden, wodurch die Auffassung nahe gelegt wird, daß sie — wenigstens in Fällen dieser Art — auf einer Reizung von Tast- oder Schmerznervenendigungen beruht.

[1]) Pflügers Arch. **97**, 1 ff., 1903.

Ganz außerordentlich viel häufiger als die Hyperakusie sind die verschiedenen Formen und Grade der Hypakusie, der Herabsetzung der Hörschärfe. Ihre Ursachen sind teils angeboren, teils erworben und bestehen in Funktionsanomalien des Mittelohres, des inneren Ohres oder des Nervensystems Wie mannigfache otiatrische Erfahrungen lehren, kann die Schwächung des Gehörs für Töne und für Geräusche ungleich sein. Bald sind erstere, bald letztere mehr benachteiligt. Mangelhaftes Hören des Uhrtickens kommt neben normaler Wahrnehmung der Flüstersprache und vermindertes Sprachgehör neben intakter Perzeption einzelner Töne vor. In vielen Fällen beschränkt sich die Schwerhörigkeit bzw. Taubheit für Töne auf einen bestimmten Abschnitt der Tonskala und dann in der Regel auf das obere oder untere Ende derselben. Es wird jedoch auch der Ausfall des einen oder anderen Teiles der mittleren Region beobachtet; namentlich bei Taubstummen sind in neuerer Zeit derartige Tonlücken und von Tonlücken begrenzte Toninseln gefunden worden, seit Bezold das ohrenärztliche Instrumentarium durch die Kontinuierliche Tonreihe, die mittels einiger Laufgewichtgabeln und Pfeifen die Erzeugung aller Töne vom tiefsten bis zum Bereich der Galtonpfeife ermöglicht, vervollkommnet und auf die Wichtigkeit der genauen Untersuchung des Hörvermögens der Taubstummen aufmerksam gemacht hat. Im ganzen zeigen also die pathologischen Beobachtungen gleichwie die Fähigkeit unseres Gehörs, Klänge in ihre Teiltöne zu zerlegen, und andere physiologische Tatsachen, daß den einzelnen Tonempfindungen eine gewisse Unabhängigkeit voneinander zukommt, und eben diese Selbständigkeit, die ja auch in der Helmholtzschen Theorie des Hörens ihre anatomische Begründung findet, macht es dem Ohrenarzt zur Aufgabe, seine Hörprüfung auf um so mehr Töne auszudehnen, je größere Ansprüche er an ihre Exaktheit stellt.

Da die Vokale kompliziert zusammengesetzte Klänge sind und auch die Konsonanten gleich anderen Geräuschen, wenn nicht ausschließlich, so doch wenigstens zum größten Teil aus verschiedenen Tönen bestehen, kann die Feststellung der Hörschärfe mittels der Sprache, der Taschenuhr, des Politzerschen Hörmessers oder aus variabler Höhe fallender Kugeln keine Resultate von streng wissenschaftlicher Brauchbarkeit liefern. Falls es auf Genauigkeit ankommt, muß man vielmehr Schallquellen wählen, die möglichst einfache Töne geben, wie die Stimmgabeln oder die weit mensurierten gedackten hölzernen Orgelpfeifen, welche letztere vor den Gabeln den Vorzug der größeren Tonstärke haben, so daß sie gelegentlich noch hörbar sind, wo für jene bereits Taubheit eingetreten ist.

Die Hörschärfe des Ohres für einen (einfachen) Ton ist umgekehrt proportional derjenigen physikalischen Intensität desselben zu setzen, bei welcher eben noch eine Wahrnehmung möglich ist. Bezeichnen wir mit H_n die normale, mit H_p die zu prüfende über- oder unternormale Hörschärfe und mit I_n bezw. I_p die zugehörigen Schwellenintensitäten, so ist $H_p : H_n = \frac{1}{I_p} : \frac{1}{I_n}$ oder $H_p = \frac{I_n}{I_p} \cdot H_n$. Für die Messung der Hörschärfe ist also die Kenntnis der absoluten Werte von I_n und I_p an sich nicht nötig, es genügt die des Verhältnisses $I_n : I_p$. Das Bestreben, eine präzise und zugleich bequeme Methode zur Bestimmung dieses Bruches zu finden, hat eine große Zahl zum Teil an Unklarheiten und Mißgriffen in bezug auf die physikalischen Vor-

fragen reicher otiatrischer Abhandlungen gezeitigt. Eine ins einzelne gehende historisch-kritische Würdigung derselben liegt nicht im Plane meiner Darstellung. Dagegen sollen im folgenden die hier in Betracht kommenden Prinzipien erörtert werden; allerdings nur mit Beziehung auf solche Töne, die durch Luftleitung zum Ohre gelangen.

Zunächst kann man daran denken, die Abnahme der Tonstärke mit der Entfernung zur Feststellung der Hörschärfe zu benutzen. Nehmen wir an, wir hätten es mit einer punktförmigen, überall von gleichartiger Luft umgebenen Tonquelle zu tun, so wird deren Energie E sich nach allen Richtungen des Raumes gleichmäßig fortpflanzen und daher in sämtlichen Punkten einer die Tonquelle als Mittelpunkt umgebenden Kugeloberfläche vom Radius r gleiche Intensität herrschen, so daß im Abstande r von dem Tonzentrum auf den Quadratmillimeter — das ist etwa der dreißigste Teil vom Querschnitte des Gehörganges — die Intensität $I = \frac{E}{4\,\pi\,r^2}$ entfällt. Hört also das normale Ohr den Ton eben noch in der Entfernung r_n, das zu prüfende in der Entfernung r_p, so verhalten sich die Schwellenintensitäten $I_n : I_p = {r_p}^2 : {r_n}^2$. Durch den Bruch $\left(\frac{r_p}{r_n}\right)^2$ wäre mithin die Hörschärfe bestimmt. Es ist aber der Einwand erhoben worden, daß der Schall gar nicht mit dem Quadrat des Abstandes, sondern im linearen Verhältnis zu demselben abnehme, ein Einwand, der sich namentlich auf gewisse Versuche von Vierordt[1]) stützt. Derselbe ließ Kugeln von verschiedener Schwere aus wechselnder Höhe auf Platten fallen und fand als Maß der Intensität des so erzeugten Schalles die Größe $p \cdot h^\varepsilon$, wobei p das Gewicht, h die Fallhöhe und ε ungefähr gleich 0,6 ist. Mit Hilfe dieses Schallmaßes kam er dann zu dem Resultat, daß die Schallstärke sich proportional der Distanz verringere. Ich selbst[2]) habe nach einer besonders zu diesem Zweck erdachten psychophysischen Methode Versuche mit Telephongeräuschen angestellt, bei denen die Abnahme der Intensität zwar in der Nähe der Schallquelle langsamer stattfand als mit dem Quadrat der Entfernung, mit wachsendem Abstande aber immer rascher vor sich ging. Der Gegenstand bedarf, wie man sieht, noch der weiteren Klärung. Was dieselbe aber auch ergeben möge, jedenfalls wird es kaum berechtigt sein, aus Beobachtungen, welche die physikalisch schwer definierbaren und teilweise von Versuch zu Versuch in ihrer Qualität schwankenden Geräusche betreffen, ohne weiteres Schlüsse auf das Verhalten von Tönen zu ziehen. Wie die Stärke eines einfachen Tones mit der Entfernung abnimmt, muß eben an Tönen studiert werden. Eine Untersuchung dieser Art verdanken wir Max Wien[3]). Sie wurde mit einer kräftigen gedackten Pfeife als Tonquelle in der Charlottenburger Rennbahn unternommen, und zwar nach der früher besprochenen Wienschen Methode der direkten Amplitudenmessung. Das Resultat war die sichere Bestätigung des Gesetzes von der Abnahme der Intensität mit dem Quadrat der Entfernung; denn obwohl die Verminderung in Wirklichkeit eine etwas schnellere war, als die Theorie es verlangt, so ließ sich dies doch vollkommen aus der Unruhe der Luft und

[1]) Die Schall- und Tonstärke und das Schallleitungsvermögen der Körper, Tübingen 1885. — [2]) Wiedemanns Ann. **57**, 785, 1896. — [3]) Ebenda, **36**, 853 ff., 1889.

der Reibung am Boden erklären. Auch Hesehus[1]), der die Distanz ermittelte, in welcher mehrere (4, 9, 16) gleichartige und gleichzeitig klingende Glocken ebenso laut gehört werden wie eine einzige in bestimmtem Abstande vom Ohre befindliche, überzeugte sich, daß die Schallstärke umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung ist, wenn letztere mehr als 10 Schritt beträgt. Indessen darf nicht übersehen werden, daß diese Versuche mit größeren Distanzen und im Freien ausgeführt sind. In geschlossenen, selbst größeren Räumen bilden sich infolge der Reflexion an den Wänden und Gegenständen stehende Wellen mit Maximis und Minimis der Intensität, also ganz komplizierte Beziehungen zwischen der Hörstärke des Tones und dem Abstand der Schallquelle vom Ohre, die sich nicht von vornherein in eine einfache Regel fassen lassen. Physiologen und Ohrenärzte sind aber meist auf Beobachtungen im Zimmer angewiesen. Dazu kommt ferner, daß unsere Tonmittel nicht als punktförmige Zentra anzusehen sind und daher den Schall nicht nach allen Richtungen mit gleicher Stärke in die Umgebung entsenden. Ganz besonders gilt dies von den Stimmgabeln, die gerade am häufigsten zur Hörschärfeprüfung Verwendung finden. Somit gelangen wir zu dem Schluß, daß die Hörweite, vor der Hand wenigstens, als Maß für die Feinheit des Gehörs nicht zu gebrauchen ist.

Der verklingende Ton einer Stimmgabel entschwindet dem Ohre um so eher, je schlechter es hört. Es ist das Verdienst v. Contas[2]), diese Tatsache zuerst zur Bestimmung der Perzeptionsfähigkeit des Ohres benutzt zu haben. Seitdem ist die Feststellung der Hördauer ein wichtiges Hilfsmittel der otiatrischen Diagnostik geworden. Sie kann indessen nur dann ein richtiges Bild der wirklichen Hörschärfe geben, wenn sich aus ihr die Intensität I_p berechnen läßt, mit welcher der Ton im Augenblick des Erlöschens das zu prüfende Ohr trifft, oder wenigstens das Verhältnis von I_p zur normalen Schwellenintensität I_n. Zu diesem Zwecke muß man wissen, in welcher Weise die physikalische Intensität mit wachsender Klangdauer der Gabel abnimmt. Wead[3]) hat für die Energie V einer tönenden Gabel die Formel $V = \frac{b\,d^3\,E}{8\,l^3}\,a^2$ abgeleitet, worin l die Länge, d die Dicke, b die Breite der Zinken, a die Amplitude und E der Youngsche Modulus für Stahl ist. Die Verminderung der Energie beim Verklingen hängt hiernach nur von der zunehmenden Verkleinerung der Amplitude ab. Letztere verläuft aber theoretisch nach einer bestimmten Gesetzmäßigkeit, nämlich so, daß die Amplitude, wenn sie in irgend einem gegebenen Moment die Größe a_0 hat, t Sekunden später auf $a_0 \cdot \frac{1}{e^{ht}}$ gesunken ist, wobei $e = 2{,}718$ die Basis der natürlichen Logarithmen und h die für jede Gabel besonders zu bestimmende Dämpfung bedeutet. Stellen wir also eine Reihe zu äquidistanten aufeinanderfolgenden Zeitpunkten gehöriger Amplitudenwerte einer Gabel zusammen, so erhalten wir

Zeiten	t	$2\,t$	$3\,t$	$4\,t$	. . .
Amplituden	$a_0 \cdot \frac{1}{e^{th}}$	$a_0 \cdot \frac{1}{e^{2th}}$	$a_0 \cdot \frac{1}{e^{3th}}$	$a_0 \cdot \frac{1}{e^{4th}}$	. . .

[1]) Journ. d. russisch. physikal. chem. Gesellsch. (7), **18**, 268, 1886; Beiblätter z. Wiedemanns Ann. 1887, S. 512. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 107, 1864. — [3]) Amer. Journ. of Science (3), **26**, 177.

Die obere Reihe ist eine arithmetische, weil die Differenz, und die untere eine geometrische, weil der Quotient je zweier benachbarter Glieder konstant ist. In der Amplitudenreihe bilden die Exponenten untereinander wieder eine arithmetische Progression: das logarithmische Dekrement bleibt gleich. Die Richtigkeit dieses Satzes ist wiederholt experimentell nachgeprüft worden. Hensen[1]) gibt an, gestützt auf „genaue Messungen an drei Stimmgabeln von 256 v. d., daß das logarithmische Dekrement hier keine Konstante ist, sondern bis zu einer Elongation von 0,07 mm an und bei einer schweren Stimmgabel von 0,8 mm an abnimmt (Log. des Dekrements: 0,000028 bzw. 0,000285), um dann wieder recht merklich, und zwar mindestens auf Log. des Dekrements: 0,000047 bzw. 0,00069, zu wachsen". Jacobson[2]) fand, wenn er eine *c*-Gabel mittels einer Schreibspitze ihre Abschwingungskurve auf einen mit berußtem Papier überzogenen rotierenden Zylinder aufschreiben ließ, daß das logarithmische Dekrement wegen der Reibung beim Ausklingen allmählich immer größer wurde, gelangte aber nach möglichster Beseitigung der Reibung zu Resultaten, die bei genügend kleinen Amplituden mit der Theorie hinreichend übereinstimmten und deren Richtigkeit nachträglich von Thiry und Koch[3]) für eine *C*-, eine c^0- und eine c^1-Gabel bestätigt wurde, während eine c^2-Gabel wegen der Kleinheit der Schwingungsweiten und der Raschheit des Abschwingens zu derartigen Versuchen bereits unbrauchbar war. Barth[4]) hat ungefähr zu derselben Zeit wie Jacobson die Abschwingungskurve einer Gabel untersucht, indem er die schwingende Bewegung eines hell beleuchteten, an die eine Zinke gekitteten Quecksilberkügelchens mikrophotographisch fixierte. Mit Berücksichtigung der mancherlei Mängel seines Verfahrens kam er zu der Überzeugung, „daß das Dekrement abklingender Stimmgabeln unter konstanten Bedingungen konstant ist". Bezold und Edelmann[5]) konstruierten einen besonderen Apparat zur graphischen Registrierung von Stimmgabelschwingungen und prüften damit die Art des Abschwingens sehr tiefer Gabeln von D_1 bis *Fis*. Da sie jedoch nur eine aus den einzelnen Aufzeichnungen nach willkürlichen Gesichtspunkten kombinierte Kurve veröffentlicht haben, so lassen sich aus ihren Angaben keine physikalisch präzisen Schlüsse ziehen. Vor kurzem hat Jacobson in Gemeinschaft mit Cowl[6]) ein photographisches Verfahren zur Messung von Stimmgabelamplituden ausgearbeitet, während einer bald danach erschienenen Studie von Ostmann[7]) wiederum die mikroskopische Beobachtungsmethode zu Grunde liegt. Letzterer Autor experimentierte in der Weise, daß er die Elongationen eines an der Zinke klebenden, Licht reflektierenden Mehlstaubkörnchens während des Ausklingens mikroskopisch verfolgte und von Zeit zu Zeit die gefundenen Werte einem Assistenten zurief, der dann die zugehörigen Zeitpunkte am Chronometer ablas. Die Untersuchung erstreckte sich auf die Gabeln *C*, *G*, *c*, *g*, c^1, g^1, c^2, c^3 und c^4. Eine kontrollierende Durchmusterung der Kurventafeln ergibt mir eine im

[1]) Physiol. d. Gehörs; Hermanns Handb. d. Physiol. **3** (2), 120, 1880. — [2]) Verh. d. Physiol. Gesellsch. z. Berlin, 1886/87, Nr. 16 u. 17; Du Bois-Reymonds Arch. f. Physiol., 1887, S. 476. — [3]) Zeitschr. f. Ohrenheilkunde **20**, 72, 1889. — [4]) Zeitschrift f. Ohrenheilk. **18**, 30, 1887. — [5]) Ebenda **33**, 174, 1898. — [6]) Engelmanns Arch. f. Physiol., 1903, S. 1 ff. — [7]) Ein objektives Hörmaß und seine Anwendung. Wiesbaden, Bergmann, 1903.

Verhältnis zu den Fehlerquellen, die in der Natur der Methode liegen, ganz gute Übereinstimmung mit den Befunden von Jacobson und Thiry, dahingehend, daß das Abschwingen im Anfang bei den größeren Amplituden zu rasch und erst später mit merklicher Konstanz geometrisch erfolgt, wie dies übrigens in ähnlicher Weise auch Braun[1]) für gespannte und nicht gespannte Stäbe gefunden hat.

Hiernach wird man, sofern es nicht gerade auf die ersten Momente nach dem Anschlagen ankommt, die Gleichung $a_t = a_0 e^{-ht}$ als hinreichend gültig zur praktischen Hörschärfeprüfung mittels der Stimmgabel benutzen dürfen. Man stelle zunächst die Zeit t_p fest, während welcher das schwerhörige Ohr die Gabel vernimmt, und bringe dann das normale Ohr genau an dieselbe Stelle des Raumes und in dieselbe relative Lage zur Gabel, an der inzwischen nichts verändert wird, um auch für dieses den Zeitpunkt t_n, in welchem der Ton eben unhörbar wird, zu bestimmen. Schreiben wir jetzt die oben angeführte Weadsche Gleichung in der einfachen Form $V = F.a^2$, so ist V zur Zeit t_p gleich $F.(a_0 e^{-ht_p})^2$. Von dieser Energiemenge gelangt jedoch nur ein Bruchteil, sagen wir $\frac{F(a_0 e^{-ht_p})^2}{N}$, an das Trommelfell des Hörenden. Die Schwellenintensität für das schwerhörige Ohr ist also $I_p = \frac{F}{N} \cdot (a_0 e^{-ht_p})^2$. Analog ergibt sich für die normale Schwellenintensität I_n der Wert $\frac{F}{N_1} \cdot (a_0 e^{-ht_n})^2$. Wenn nun beide Ohren unter genau den nämlichen äußeren Bedingungen beobachten, wie hier vorausgesetzt ist, so werden N und N_1 als gleich anzusehen sein, und wir erhalten die Proportion $I_n : I_p = (a_0 e^{-ht_n})^2 : (a_0 e^{-ht_p})^2$. Der Bruch $\left(\frac{a_0 e^{-ht_n}}{a_0 e^{-ht_p}}\right)^2$ ist aber gleich $\frac{e^{-2ht_n}}{e^{-2ht_p}} = e^{-2h(t_n - t_p)}$ und mithin die gesuchte Hörschärfe $H_p = e^{-2h(t_n - t_p)} \cdot H_n$. Diese schon von Jacobson[2]) erörterte Methode erfordert allerdings, daß die Dämpfung h für jede einzelne Stimmgabel ermittelt und von Versuch zu Versuch sorgfältig konstant erhalten wird. Dafür liefert sie indessen auch brauchbare Resultate, während z. B. das von A. Hartmann[3]) trotz mehrfacher Zurückweisungen noch immer empfohlene Verfahren, einfach $H_p = \frac{t_p}{t_n} \cdot H_n$ zu setzen, auf Wissenschaftlichkeit keinen Anspruch erheben kann, wie aus dem Vorstehenden ohne weiteres hervorgeht. Gegen die Benutzung der Hördauer als Maß der Hörschärfe wird zuweilen eingewendet, daß es sehr schwierig für das gesunde Ohr sei, den Moment, wo der Ton gerade verschwindet, präzise anzugeben. Allein etwaige Schwankungen, die mehrere Sekunden betragen können, verlieren hier deswegen an Gewicht, weil in der Nähe der normalen Schwelle die Amplituden sehr langsam abnehmen, was eben auch der Grund für das subjektiv unscharfe Verklingen ist. Ein Schwerhöriger kann das Minimum perceptibile sicherer fixieren, weil es bei ihm in den steileren Anfangsteil der Abschwingungskurve fällt.

Manche Ohrenärzte, wie Panse, Bezold und Ostmann, streben danach,

---

[1]) Pogg. Ann. **47**, 64, 1872. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **25**, 40 ff., 1887. — [3]) Die Krankheiten des Ohres und deren Behandlung. Berlin 1902.

direkt die Amplitude a_p zu finden, mit welcher die Gabel zur Zeit t_p schwingt. Selbstverständlich darf man a_p nicht unmittelbar als Maß der Hörschärfe betrachten, denn dieses ist und bleibt I_p, die Schwellenintensität des Tones am Trommelfell. I_p hängt aber von verschiedenen Umständen ab: erstens, da es sich um Töne handelt, nach fundamentalen Prinzipien der Physik von dem Quadrat der Amplitude, nicht von deren erster Potenz; zweitens, wie die Weadsche Formel lehrt, von der speziellen Beschaffenheit der benutzten Gabel; drittens von dem Verlust, den die Energie der Gabel erleidet, ehe sie als Schall das Ohr trifft. Dieser Verlust ist dadurch bedingt, daß ein Teil der Energie durch innere Reibung in Wärme verwandelt, ein anderer Teil durch den Stiel an die Umgebung abgegeben wird, wobei — was besonders betont zu werden verdient — die Art der Einklemmung von wesentlichem Einfluß ist. Wieviel akustische Energie aber in einem gegebenen Falle übrig bleibt, läßt sich schwerlich feststellen und ebensowenig, wieviel davon gerade an das Trommelfell gelangt, da die Verteilung der Tonintensität in geschlossenen Räumen und in der Nähe reflektierender Gegenstände so gut wie unkontrollierbar ist. Somit kann man aus a_p allein nicht einmal einen Schluß auf den Wert von I_p ziehen, da eben I_p gleich $\frac{b d^3 E}{8 l^3} \cdot a_p^2$, dividiert durch die unbekannte Größe N, ist. Anders verhält es sich dagegen, wenn außer a_p auch zugleich a_n, die Schwellenamplitude des normalen Ohres, mit derselben Gabel in demselben Raum und überhaupt unter absolut gleichen Bedingungen bestimmt wird. Dann ist $I_n = \frac{b d^3 E a_n^2}{8 l^3 N}$ zu setzen und damit $H_p = \left(\frac{a_n}{a_p}\right)^2 H_n$ gegeben. Eine hierauf basierende Hörschärfeprüfung würde etwa in folgender Weise vorzunehmen sein. Zuerst wird die Abschwingungskurve der zu verwendenden Gabel konstruiert, wobei die auf den Anschlag folgenden Zeiten die Abszisse, die zugehörigen Amplituden die Ordinaten bilden. Dann wird der Ton der Gabel, die mit derselben Anfangsamplitude wie vorher in Schwingungen versetzt ist und an deren Montierung wegen des Einflusses der Einklemmung auf die Dämpfung nichts geändert sein darf, von dem zu prüfenden und dem normalen Ohre beobachtet und nach der Uhr die Zeit t_p bzw. t_n gemessen, worauf sich die diesen Zeitpunkten entsprechenden Amplituden a_p und a_n unmittelbar aus der Kurve oder einer Tabelle entnehmen lassen. Die Herstellung einer exakten Abschwingungskurve ist jedoch nichts weniger als einfach. Besser ist es schon, während des Versuches die Amplituden der Gabel direkt an ihr abzulesen, wofür Gradenigo[1]) ein besonderes Verfahren empfohlen hat. Nach reiflicher Überlegung aller in Betracht kommenden Punkte wird man indessen sagen müssen, daß die Stimmgabel überhaupt kein ideales Instrument für die Hörschärfebestimmung ist. Es ist darum auch wiederholt in Vorschlag gebracht worden, elektrische Apparate zu benutzen[2]).

[1]) Siehe Arch. f. Ohrenheilk. **50**, 285, 1900 und Struycken, Zeitschr. f. Ohrenheilk. **46**, 378, 1904. — [2]) Z. B. durch Hartmann, Du Bois-Reymonds Arch. f. Physiol. 1878, S. 155; Wodtke, Über Hörprüfung usw., Dissertation, Rostock 1878; Hughes, Nature, 1879, p. 77 u. 102; W. Preyer, Jenaische Gesellsch. f. Med. u. Naturw. Sitzung v. 21. Februar 1879; Jacobson, Du Bois-Reymonds Arch. 1888,

Dieselben beruhen fast alle auf dem Prinzip, daß durch Stromschwankungen die Platte eines Telephons zum Tönen gebracht und die Tonintensität durch Schwächung der Stromstärke bis zur Schwelle erniedrigt wird. Die älteren Autoren suchten dieses Ziel entweder auf dem Wege zu erreichen, daß in den Stromkreis eines möglichst konstanten Elementes eine elektromagnetische Unterbrechungsgabel oder ein Neefscher Hammer als Erreger des Telephons eingeschaltet und die Stromstärke durch einen Rheostaten reguliert wurde, oder sie ließen den Strom des Elementes außer durch den Unterbrecher durch eine primäre Rolle gehen, mit deren sekundärer das Telephon verbunden war, und die Abschwächung des Telephontones geschah mittels Entfernung der Rollen voneinander. Beide Anordnungen haben den Übelstand, daß die Tonhöhe sich nur schwierig oder wenig variieren läßt und daß die Telephonplatte keine einfachen Töne gibt. Das Audiometer oder Sonometer von Hughes, bei dem übrigens die Telephonrolle auf einem Schlitten zwischen zwei entgegengesetzt induzierenden Spulen angebracht ist, enthält im primären Stromkreis ein Mikrophon. Von diesem könnte man den Ton einer mit verschieblichem Stempel versehenen und daher in der Tonhöhe variablen Pfeife aufnehmen lassen; aber dann müßte wieder für die präzise Konstanz des Mikrophons und des Pfeifentones gesorgt werden. Jacobson hat in der angeführten Untersuchung sein Augenmerk besonders darauf gerichtet, die Unreinheit der Plattentöne zu beseitigen, und sich zur Telephonerregung einer immer gleich stark angeschlagenen und dann ausschwingenden Gabel bedient. Indessen ist hierbei wieder für einen genügenden Wechsel der Tonhöhe ein sehr umfangreiches Gabelmaterial nötig. Von einem wirklich tadellosen Hörschärfemesser wird man verlangen müssen, daß er leicht Töne von jeder gewünschten Höhe liefert, daß die Töne rein sind, daß ihre Intensität exakt meßbar ist und daß sie dem Ohre zur bequemen Beobachtung beliebig lange in gleichmäßiger Stärke dargeboten werden können. Am besten scheint mir allen diesen Anforderungen das von Wien angegebene Instrumentarium zu entsprechen. Auch dieser Autor benutzte als Tonquelle ein Telephon, das fest an das Ohr gedrückt wurde oder mit einem Deckel nebst Ansatzrohr zum Einführen in den Gehörgang versehen war, wobei freilich zugleich durch Luft- und Knochenleitung gehört wird. Die Ströme, die möglichst sinusförmige Wechselströme sein mußten, um einfache Töne zu erzeugen, wurden für die tieferen Töne von einem Sinusinduktor, für die höheren von einer Wechselstromsirene, deren Bau und Wirkungsweise a. a. O. genau beschrieben ist, geliefert. Bei schwachem Strom ist der Ausschlag der Telephonplatte dem Strome proportional, die Tonintensität also proportional dem Quadrat der Stromamplitude und die Empfindlichkeit des Ohres für die jeweilige Schwingungszahl umgekehrt proportional dem Quadrat des Minimalstromes, der den Schwellenton erzeugt. Vorausgesetzt ist hierbei, daß der gehörte Ton tiefer ist als der erste Eigenton der Platte und daß die Länge des Gehörganges gegen die Wellenlänge zu vernachlässigen ist.

Was nun die äußeren Umstände bei der Bestimmung des geringsten, eben noch wahrnehmbaren Stärkegrades eines Tones betrifft, so muß in erster

S. 189; Gradenigo, Arch. f. Ohrenheilk. 30, 240, 1890; Max Wien, Pflügers Arch. f. Physiol. 97, 1 ff., 1903; vgl. ferner N. Vaschide, De l'audiométrie, Bulletin de Laryngol. etc. t. IV, 1901, chap. 5.

Linie für möglichste Stille der Umgebung Sorge getragen werden. Es ist eine alltägliche Erfahrung, daß die Perzeption eines Tones oder Geräusches durch das gleichzeitige Vorhandensein eines anderen Schalles beeinträchtigt, ja sogar völlig unmöglich gemacht werden kann. Wissenschaftliche Beobachtungen hierüber sind zuerst von A. M. Mayer[1]) angestellt worden, welcher angibt, daß ein tieferer Ton einen höheren zu verdrängen vermöge, nicht aber umgekehrt. Stumpf[2]) bestreitet die Richtigkeit dieser Behauptung, wenigstens in so extremer Form; das Summen einer tiefen Gabel ist neben hohen Zungenpfeifen unhörbar, und der Ton einer vor dem Ohre klingenden *C*-Gabel verschwindet, wenn eine *F*-Gabel von einer gewissen Tonstärke genähert wird. Soviel erscheint ihm jedoch richtig, daß der höhere Ton ein größeres Übergewicht an Empfindungsstärke besitzen muß, um den tieferen auszulöschen, als umgekehrt. In bezug auf die Unterdrückung von Tönen durch Geräusche bemerkt Kessel[3]), daß die drei untersten Oktaven, C_2 bis c, relativ leichter überdeckt werden als die folgenden und daß von c bis c^2 die Geräusche die Töne noch sehr beträchtlich beeinflussen, während dies von c^2 aufwärts schon weit weniger der Fall ist; die geringere Empfindungsstärke der tiefen Töne reiche aber nicht zur Erklärung dieses Unterschiedes aus.

Benachteiligen sich somit schon übermerkliche akustische Nervenprozesse gegenseitig in der Intensität der Empfindung, so wird dieses Verhältnis ganz besonders bei eben merklichen Schalleindrücken zu beachten sein. Es gehört allerdings zu den schwierigsten Aufgaben, zum Zwecke akustischer Beobachtungen völlige äußere Ruhe herzustellen. Selbst wenn man in einer windstillen Nacht dieses Ziel erreicht zu haben glaubt, wird man immer noch mittels Resonatoren die Existenz irgend welcher Geräusche konstatieren können. Dazu kommt, daß im Ohre selbst durch die Blutbewegung, durch gelegentliche Kontraktionen der Binnenohrmuskeln oder Erschütterungen der Gehörknöchelchenkette, vielleicht auch infolge von Stoffwechselprozessen fortwährend gewisse, wenn auch sehr schwache, Gehörsreize ausgelöst werden. Das Bemerken derselben (beim Fehlen von Schall in der Umgebung) hat Preyer[4]) als die Empfindung der Stille bezeichnet, die er im Gegensatz zu Fechner in Parallele zur Wahrnehmung des Augenschwarz bringt. Gerade wie das Sehen des letzteren eine positive Empfindung und verschieden von dem Nichtsehen sei, so wäre auch die Perzeption der Lautlosigkeit verschieden von dem Nichtshören schlechthin, und die entotischen Geräusche und Klänge verhielten sich zu dieser Empfindung wie die mannigfachen entoptischen Erscheinungen zur Wahrnehmung des Augenschwarz. Hiergegen läßt sich einwenden, daß die Summe der inneren Empfindungen des Ohres für sich unzweifelhaft dem gänzlichen Empfindungsmangel viel näher kommt als die der Eigenempfindungen der Retina, sofern man von vorübergehenden oder abnormen Intensitätssteigerungen absieht. Eine absolute Stille im Ohre scheint es indessen nach aller Erfahrung in der Tat nicht zu geben. In dieser Hinsicht könnte man die Frage nach der Größe der eben merklichen Tonstärke auch als ein Problem der Unterschiedsempfindlichkeit auffassen.

---

[1]) Nature, Vol. XIV, No. 354; Amer. Journ. of Science and Arts **12**, 329, 1876. — [2]) Tonpsychologie **2**, 227, 1890. — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 140. — [4]) Grenzen der Tonwahrnehmung, Jena 1876, S. 67.

Denn ein von außen das Gehörorgan treffender minimaler Schall wird erst dann imstande sein, ins Bewußtsein vorzudringen, wenn er sich von den innerlichen Erregungen in genügendem Grade abhebt.

Für eine exakte Bestimmung der Intensitätsschwelle ist neben der möglichst vollständigen Isolierung des betreffenden Tones auch noch die Konzentration der Aufmerksamkeit auf denselben erforderlich, also alles das nützlich, was einer Ablenkung entgegenwirkt. Wien hat daher mit Recht zu seinen früher erwähnten Versuchen intermittierende Töne benutzt. Denn eine gleichmäßig anhaltende Wahrnehmung entschwindet leicht dem Bewußtsein, während das Schwankende, überhaupt das Bewegte, auf allen Sinnesgebieten den inneren Blick, wenn man so sagen darf, auf sich zieht und fesselt. So werden bekanntlich Töne, welche schweben, aus einem Klange vielfach besser herausgehört, als wenn keine Stöße vorhanden sind. Ist aber die Aufmerksamkeit gespannt auf einen Ton gerichtet, so wird dieser dadurch geradezu verstärkt, wenn er nicht schon an sich sehr kräftig ist[1]), was zum Teil jedenfalls in der Abstraktion von den begleitenden Schallwahrnehmungen seinen Grund hat, zum Teil wohl auf noch unbekannten psychophysischen Prozessen beruht.

Es ist vielfach behauptet worden, daß die subjektive Intensität minimaler Gehörsempfindungen fortwährenden Schwankungen unterliege. Für Geräusche trifft dies unzweifelhaft zu. Entfernt man sich beispielsweise von einer gleichmäßig gehenden Taschenuhr bis fast ans Ende ihrer Hörweite, so kommt man an einen Punkt, wo die einzelnen Schläge bald lauter, bald leiser erscheinen und vorübergehend ganz ausfallen. Eine sichere Erklärung hierfür läßt sich zurzeit noch nicht geben; nur so viel steht fest, daß die Pausen nicht auf einem Versagen der Aufmerksamkeit beruhen, da sie auch bei angestrengtem Lauschen eintreten. Ob auch Tonempfindungen in der Nähe der Schwelle intermittieren, darüber sind die Ansichten geteilt. Politzer[2]), dem andere Ohrenärzte hierin beistimmen, spricht direkt von der schwankenden Perzeptionsfähigkeit des Hörnerven für schwache Schallvibrationen, wenn er auch den Einfluß äußerer Umstände, wie störende Geräusche, Kopfbewegungen, Ortswechsel der Schallquelle u. dgl., nicht ganz ausschließt. Hessler[3]) fand, daß die Töne von Stimmgabeln kurz vor dem völligen Ausklingen wellenförmig an- und abschwollen und daß der Rhythmus, in dem dies geschah, stets mit dem Herzschlag isochron war. Er beruft sich dabei auf Mach[4]) als Gewährsmann, der gleichfalls mit den Pulsstößen koinzidierende Tonschwankungen konstatiert habe. Diese Schwankungen betrafen aber überschwellige Töne und waren besonders deutlich bei kräftigem Pulse. Dagegen stimmt eine gelegentliche Angabe Preyers, die sehr hohe und sehr leise subjektive Töne betrifft, mit Hesslers Beobachtungen überein. Conta[5]), der die Hörzeit ausklingender Töne untersuchte, hat nichts von Tonschwankungen an der Schwelle mitgeteilt. Urbantschitsch[6]) gibt an, die Tonstärke steige und sinke abwechselnd beim Verklingen, der Ton pausiere auch zeitweilig ganz; jedoch sei dieses Verhalten von Herztätigkeit und

[1]) Vgl. hierzu Stumpf, Tonpsychologie 1, 373 u. § 22. — [2]) Arch. f. Ohrenheilkunde 12, 109. — [3]) Ebenda 18, 233. — [4]) Wiener Ber., mathem.-naturw. Kl., 50, (2), 348. — [5]) Arch. f. Ohrenheilk. 1, 111. — [6]) Zentralbl. f. d. mediz. Wissenschaften 1875, S. 625 f.

Respirationsbewegungen durchaus unabhängig. W. Heinrich[1]) ist wiederholt mit Nachdruck dafür eingetreten, daß eben noch hörbare Töne keinerlei Intensitätsschwankungen zeigten[2]), daß vielmehr, wo dies scheinbar der Fall sei, die Mitwirkung von Geräuschen schuld wäre. Ich selbst kann beim Horchen auf erlöschende Stimmgabeltöne, mögen dieselben durch Luftleitung oder durch Knochenleitung zum Ohre gelangen, ebenfalls keine Schwankungen konstatieren, oder wenigstens keine, die sich mit der Unregelmäßigkeit des eben merklichen Uhrentickens auch nur entfernt an Deutlichkeit messen könnten, und neige der Ansicht zu, daß es sich, wo solche auftreten, um momentane Störungen des Aufmerkens handelt. Bezüglich der Intensitätsänderungen mit dem Pulse ist wohl in erster Linie an individuelle Unterschiede zu denken[3]).

e) Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonstärken.

Es bleibt nun noch die Frage, wie sich die Empfindungsstärke eines Tones mit dem stetigen Wachsen oder Fallen der physikalischen Intensität verändert, mit anderen Worten die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonstärken zu erörtern. Auf dem Gebiete der Geräusche liegen mehrere entsprechende Untersuchungen vor, wovon später noch weiter die Rede sein wird; in betreff der Töne, die uns an dieser Stelle allein interessieren, ist dagegen nur eine Abhandlung zu erwähnen, nämlich die schon oben angeführte Dissertation von Max Wien über die Messung der Tonstärke[4]). Derselbe benutzte kurz aufeinanderfolgende Telephontöne, deren Stärkeverhältnisse bis auf Bruchteile von Prozenten meßbar waren. Die Versuche wurden meist nach der Methode der Minimaländerungen angestellt. Die Tonhöhen, welche zur Verwendung kamen, waren a, a^1 und e^1, jedoch betrifft die überwiegende Zahl der Beobachtungen den Kammerton. Es wurde zunächst als Ausgangsreiz ein sehr geringer Intensitätsgrad dieses Tones gewählt und dazu der eben merklich in der Stärke verschiedene Vergleichsreiz aufgesucht. Dann wurde der Ausgangsreiz auf das Zehnfache gesteigert und so fortgefahren bis zu sehr beträchtlichen Intensitätswerten. Trotzdem bei den Versuchen nach möglichster Vermeidung der verschiedenen Fehlerquellen gestrebt wurde, betrug der wahrscheinliche Fehler der einzelnen Einstellung doch etwa 15 bis 20 Prozent. Immerhin ergab sich aber im ganzen ein annäherndes Zutreffen des Weberschen Gesetzes von der Konstanz der relativen Unterschiedsschwelle.

f) Kürzeste Töne.

Wenn die Dauer eines physikalischen Tones ein gewisses Minimum nicht überschreitet, tritt keine Empfindung ein. Man kann also auch von einer Dauerschwelle reden. Savart[5]) dürfte der erste gewesen sein, welcher sich mit derselben beschäftigt hat. Mit Hilfe eines an einer Metall- oder Pappscheibe schleifenden Zahnrades fand er, daß schon zwei Impulse von dem Ohre als

[1]) Siehe Bulletin internat. de l'acad. des sciences de Cracovie 1900 (Jan.), S. 37 bis 45. — [2]) Zu demselben Resultat gelangte auch Wodtke bei Benutzung von Telephontönen. (Über Hörprüfung usw., Diss., Rostock 1878, S. 34.) — [3]) Vgl. hierzu noch C. Stumpf, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **21**, 115 ff. — [4]) Auch Ann. d. Phys. u. Chem., N. F., **36**, 843 ff., 1889. — [5]) Ann. de chim et phy.s. **44**, 348, 1830.

ein der Höhe nach bestimmbarer Ton aufgefaßt werden könnten. Villari und Marangoni[1]) knüpften an seine Versuche an. Sie meinten, daß bei denselben Nachschwingungen nicht ausgeschlossen wären, und benutzten daher Gabeln, deren Töne durch einen verschließbaren Kautschukschlauch beobachtet wurden. Der Verschluß des Schlauches wurde so lange gehoben, bis der Ton eben hörbar war, wobei die Zeit der Öffnung sich durch eine Registriervorrichtung genau bestimmen ließ. Als Tonquellen dienten die Gabeln d^1, e^2 und e^3. Die gefundenen Dauerminima waren für d^1 3,3, für e^2 5,0, für e^3 6,8 Schwingungen, wenn die Töne etwas leiser waren; bei größerer Stärke sanken die Zahlen auf bzw. 2,7, 4,1, 5,8. Da die Distanz der Gabeln je eine bzw. fast eine Oktave bildete und die Differenz der Dauerminima nahezu konstant war, so folgerten die Autoren, daß das gleiche Verhalten auch wohl für die übrigen Oktaven des Tonreiches zutreffen dürfe.

Mach[2]) versuchte, die Ermittelung der kleinsten zur Tonwahrnehmung nötigen Anzahl von Schwingungen in folgender Weise zu erreichen. Eine elektrische Gabel, eine Zungenpfeife oder sonst ein passendes Instrument wurde in einen schalldichten Kasten gebracht. Aus diesem trat der Ton durch ein gegabeltes Rohr heraus, dessen einer Zweig zu einem Koenigschen Brenner führte. Der andere Zweig ging hart bis an eine Pappscheibe und auf deren anderer Seite weiter bis zum Ohre des Beobachters. Die Scheibe hatte einen radialen Ausschnitt und trug einen gegen die Achse geneigten Spiegel, in den man durch den Ausschnitt hineinsehen konnte. Wurde sie in Rotation versetzt, so hörte man den Ton nur, während der Ausschnitt das Rohr passierte, und konnte dabei zugleich die Schwingungen, die vernommen wurden, an den Flammenbildern im Spiegel zählen. Erhielt das Ohr zu wenig Schwingungen, so resultierte nur ein trockener Schlag, an dem keine Tonhöhe mehr zu unterscheiden war. Das c^1 war als solches erst bei vier bis fünf Schwingungen erkennbar. Bei tiefen Tönen traten die Obertöne noch deutlich hervor, wenn der Grundton wegen zu großer Kürze bereits verschwunden war.

Eine wesentlich höhere Dauerschwelle fand S. Exner[3]). Er ließ, um möglichst reine Töne zu bekommen, den Ton einer elektrischen Gabel durch einen Resonator in einen Kautschukschlauch und aus diesem ins Ohr des Beobachters treten. Der Schlauch war vor dem Versuch abgeklemmt und konnte durch eine Fallvorrichtung für eine sehr kurze, übrigens variable und meßbare Zeit geöffnet werden. Es ergab sich, daß der Ton von 128 Schwingungen dann die erste Spur einer Tonempfindung von spezifischer Höhe erzeugte, wenn rund 17 Wellen das Ohr trafen. Die tiefere Oktave, *C*, erforderte ebensoviel Schwingungen, also die doppelte Zeit der Einwirkung auf das Gehör.

J. v. Kries und F. Auerbach[4]) gelangten auf Grund ihrer psychophysischen Reaktionsversuche zu der Anschauung, daß zunächst neun bis zehn Schwingungen stattfinden müßten, bis die Bewegung in den Endapparaten des Acusticus ausreichend geworden sei, um überhaupt einen psychischen

---

[1]) Il nuovo Cimento **28**, (2), I, 382—398, 1868/69. — [2]) Lotos **23**, 146, 1873. — [3]) Pflügers Arch. **13**, 232 f., 1876. — [4]) Du Bois-Reymonds Arch. f. Physiol. 1877, S. 297; vgl. auch F. Auerbach, Wiedemanns Ann. **6**, 591, 1879.

Effekt auszulösen. Dabei sei diese Zahl unabhängig von der Tonhöhe, aber abhängig von der Intensität der Erregung zu denken. Für die Auffassung der Empfindung als einer solchen von bestimmter, von anderen unterscheidbarer Tonhöhe wären dann aber noch weitere 10 Schwingungen notwendig. Im ganzen stimmen also diese Autoren mit Exner dahin überein, daß ungefähr 20 Schwingungen zur Erkennung eines Tones erforderlich seien.

Demgegenüber sind sämtliche späteren Forscher auf verschiedenen Wegen der Untersuchung zu dem gleichen Resultate gekommen, daß zwei Schwingungen bereits zur Tonperzeption genügen. Zunächst ist hier Pfaundler[1]) zu nennen, dem sich Oppel[2]) vollständig anschloß. Pfaundler konstruierte eine Seebecksche Sirene mit neun konzentrischen Löcherreihen. Die äußerste enthielt 72 gleich weit abstehende Löcher, die zweite war ebenso beschaffen, nur fehlte je das neunte Loch, die dritte desgleichen, nur fehlte je das achte und neunte Loch und so fort. Blies man die Reihen nacheinander an, so hörte man den Ton 72 der ersten Reihe auch noch aus dem Klange der folgenden, bis zur siebenten einschließlich, obwohl mit abnehmender Deutlichkeit, heraus. Bei der achten, in welcher der Ton 72 nur noch durch eine achtmalige Wiederkehr von je zwei Impulsen pro Umdrehung repräsentiert war, wurde seine Wahrnehmung unsicher. Durch eine Nachahmung der bekannten Baumgartenschen Reflexionstöne an der Sirene überzeugte sich Pfaundler aber schließlich davon, „daß im Minimum zwei Schallimpulse auf die mitschwingenden Teile des Ohres genügen können, um die Empfindung eines Tones hervorzurufen, und daß diese Empfindung durch rasche Wiederholung zum Bewußtsein gebracht werden kann".

Läßt man wiederholt zwei gleichartige Geräusche sehr schnell, aber ungleich schnell, aufeinander folgen, so verbindet sich mit der Wahrnehmung der Succession immer eine Tonhöhenempfindung und zwar jedesmal eine andere. Hierauf ist von verschiedenen Autoren aufmerksam gemacht worden. Exner[3]) benutzte zur Feststellung der kleinsten noch wahrnehmbaren Zeitdifferenz zwischen zwei gleichen Gehörsreizen unter anderem überspringende elektrische Funken. Ein Intervall von 0,002 Sekunden zwischen je zweien war eben noch merklich. Wuchs die Zeitdistanz, so hatte man den Eindruck, daß das Geräusch des Doppelschlages tiefer wurde. Beobachtungen dieser Art, wozu auch die Tonempfindungen zu zählen sind, welche z. B. entstehen, wenn man mit einem Bleistift oder dem Fingernagel über kurze Strecken gerippten Papiers fährt, legen schon an sich den Schluß nahe, daß zwei Impulse zu einer Tonwahrnehmung ausreichen. Exner selbst scheint freilich diesem Schlusse nicht recht zustimmen zu wollen, aber, wie ich glaube, mit Unrecht. Denn, wenn er sagt[4]), man habe bei den Doppelfunkenversuchen zwar eine Höhenempfindung, aber keine eigentliche Tonempfindung, so beruht dieses Urteil wohl nur darauf, daß sich ein enorm kurzer Ton eben anders anhört als ein gewöhnlicher; und wenn er weiter anführt, daß zwei aufeinanderfolgende Funken keinen Ton erzeugen könnten, da nach seinen Erfahrungen auch 32 bzw. 64 pro Sekunde aufeinanderfolgende Funken keinen

[1]) Wiener Sitzungsber., mathem.-naturw. Kl., **76**, (2), 561, 1878; über ähnliche Versuche von Seebeck und kritische Bemerkungen dazu siehe Ohm, Pogg. Ann. **59**, 554 f. — [2]) Jahresber. d. Physikal. Vereins zu Frankfurt a. M. 1879/80, S. 30. — [3]) Pflügers Arch. **11**, 417 f., 1875. — [4]) Ebenda **13**, 240.

Ton von 32 bzw. 64 Schwingungen lieferten, so ist dagegen zu bemerken, daß die Töne 32 und 64 in den fraglichen Versuchen offenbar nur zu leise waren, um herausgehört zu werden.

Kohlrausch[1]) hat denn auch in einer kurzen Publikation über das Hervorbringen von Tönen durch Doppelschläge, die mit den Fingern gegen eine feste Masse geführt werden, direkt ausgesprochen, daß Töne schon durch zwei Impulse entstehen könnten. Er bestätigte dies bald darauf durch eine sorgfältige experimentelle Untersuchung[2]), bei welcher eine Vorrichtung nach dem Muster des Savartschen Verfahrens die Grundlage der Versuchsanordnung bildete und die den zwei Impulsen entsprechenden Tonhöhen durch Vergleichen mit Saitentönen bestimmt wurden. Die Untersuchung ergab außerdem, daß für ein Ohr von mittlerer Feinheit die mögliche Schärfe in der Definition der Höhe eines Tones von 2 bis zu 16 Schwingungen, darüber hinaus aber nicht mehr zunimmt. Hiernach könnte der Umstand, daß einzelne Beobachter mehr als zwei Schwingungen zur Erkennung der Tonhöhe nötig gefunden haben, vielleicht auf einen gewissen Mangel an Übung in der raschen und genauen Bestimmung von Tonhöhen zurückzuführen sein.

Cross und M. Maltby[3]) verbanden zwei Telephone zu einem Stromkreise. Auf die Platte des einen wurde eine tönende Gabel, c^1 oder c^2, aufgesetzt, an dem anderen wurde gehört. Ein Unterbrecherrad bewirkte, daß der Strom immer nur für eine kurze Zeit, die sich aus der Rotationsperiode des Rades berechnen ließ, zum Hörtelephon gelangte. Störende Nebengeräusche waren beseitigt. Es wurde gefunden, daß für c^1 0,88 und für c^2 1,76 Schwingungen hinreichten, um den betreffenden Ton in 70 bis 80 Proz. der Fälle richtig zu erkennen. Der wichtigen Frage, ob nicht etwa Nachschwingungen der Telephonplatte stattfanden, haben die Autoren besondere Aufmerksamkeit zugewendet. Mittels eines die Lissajousschen Figuren zu Hilfe nehmenden Verfahrens ließ sich zeigen, daß es nicht der Fall war. Die Dauerschwellen sind auffallend niedrig, doch meint auch R. Schulze[4]), daß ein Ton bei 1,8 Schwingungen bereits in seiner Höhe charakterisiert sei, während andererseits Herroun und Yeo[5]) wieder zwei Tonschwingungen als Minimum perceptibile angegeben haben.

Im Anschluß an gelegentliche Versuche von Max Meyer[6]), der für die Bestimmung des Tones von 176 Schwingungen fünf Impulse, für 352 Schwingungen dagegen nur drei und für den Ton 704 nur noch zwei nötig fand, hierbei aber wie Kohlrausch konstatierte, daß die Töne mit zunehmender Zahl der Impulse an Deutlichkeit gewinnen, haben Abraham und Brühl[7]) mit Hilfe der Löchersirene eine den größten Teil des Tongebietes umfassende Untersuchung über unseren Gegenstand ausgeführt, wobei das absolute Tonbewußtsein des ersteren die Feststellung der in Frage kommenden Tonhöhen ganz wesentlich erleichterte. Die Ergebnisse waren die folgenden. Von der Kontraoktave bis zur Mitte der viergestrichenen genügten zwei Schwingungen für eine Tonempfindung und die (immer exakt kontrollierte) Beurteilung ihrer Höhe. Eine mehrfache Wiederholung der zwei Luftstöße war nicht, wie

[1]) Wiedemanns Ann. **7**, 335, 1879. — [2]) Ebenda **10**, 1, 1880. — [3]) Proceed. Amer. Acad. Boston **19**, 222—235, 1891. — [4]) Wundts Philos. Stud. **14**, 487, 1898. — [5]) Proç. Roy. Soc. **50**, 318—323, 1892. — [6]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **11**, 207 ff. — [7]) Ebenda **18**, 177, 1898.

Pfaundler meinte, erforderlich, obwohl die Urteilszeit dadurch allerdings geringer wurde. Von der Mitte der viergestrichenen Oktave an stieg die Minimalzahl der Schwingungen stetig. Die sehr kurzen Töne waren schwächer als länger dauernde von gleicher Höhe und erschienen hinsichtlich der Klangfarbe milder und weniger spitz. Nachschwingungen und Reflexionswellen erwiesen sich als belanglos für die Tonempfindung.

Ein Überblick über alle hier erwähnten Arbeiten wird uns zu dem Schlusse veranlassen, daß zwei Schwingungen zur Erkennung eines Tones im allgemeinen hinreichen. Wenn einige Forscher eine größere Anzahl angegeben haben, so mag dies, wie schon angedeutet, auf individuellen Schwankungen in der Fähigkeit, Tonhöhen schnell aufzufassen, beruhen, vielleicht auch auf erschwerenden Eigentümlichkeiten ihrer Versuchstechnik. Was speziell die komplizierte Methode von Auerbach und v. Kries anlangt, so hat Götz Martius[1]) auf Grund ähnlicher Versuche sich dahin ausgesprochen, daß deren Resultate in betreff der Dauerschwelle der Tonwahrnehmung hinfällig seien, und hält auch seinerseits, obschon mit einer gewissen Unsicherheit, drei Schwingungen für ausreichend.

g) Anklingen und Abklingen.

Als sicher festgestellt ist die Tatsache zu betrachten, daß eine Tonempfindung in den ersten Momenten ihres Bestehens mit jeder folgenden Schwingung sowohl an Klarheit bezüglich der Tonhöhe als auch an Stärke zunimmt. Es findet also wie bei den Gesichtswahrnehmungen ein Anklingen der Empfindung statt. Bei seinen Versuchen über die minimale zur Tonperzeption nötige Anzahl Wellen konstatierte Exner zugleich, daß der Ton *C*, allmählich lauter und lauter werdend, erst bei ungefähr 44 Schwingungen das Maximum der subjektiven Intensität erreichte; bei der Oktave c^0 waren hierfür nahezu ebensoviel Impulse, nämlich etwa 48, erforderlich. Dabei hatte er den Eindruck, als wachse die Stärke anfangs sehr schnell, später recht langsam, weshalb es auch schwierig war, das Maximum präzise zu fixieren. Für das qualitative Deutlicherwerden der Tonempfindungen mit der Zunahme der Tondauer ist die folgende, von Max Meyer am angeführten Orte unter ähnlichen mitgeteilte Beobachtung besonders bezeichnend. Bestand bei einem, den Ton f^1 betreffenden Sirenenversuche die Periode aus zwei Löchern, „so hatten die Stöße keine Spur von Toncharakter; bei drei Löchern machte sich etwas Tonähnliches in dem Geräusch geltend; bei vier Löchern begannen die Stöße die verlangte Tonhöhe anzunehmen, aber noch schwach und undeutlich; bei fünf Löchern . . . war die Höhe der Tonstöße klar erkennbar". Auf die Schwäche einer eben beginnenden Tonempfindung machen ja auch Abraham und Brühl aufmerksam und erblicken in ihr eine wesentliche Ursache für die Schwierigkeit der Unterscheidung zwischen einem äußerst kurzen Tone und einem Geräusche.

Urbantschitsch[2]) studierte die Erscheinung des Anklingens an Gesunden und an Ohrenkranken mit Stimmgabeltönen von verschiedener Stärke. Dabei zeigte sich, daß ein sehr leiser Ton erst nach ein bis zwei Sekunden

[1]) Wundts Philos. Stud. **6**, (3), 394 und **7**, (3), 469, 1891. — [2]) Pflügers Arch. **25**, 323 bis 342, 1881.

in seiner vollen Intensität wahrgenommen wurde. Kam die physikalische Stärke dem Schwellenwerte nahe, so hörte man den Ton im Beginne seiner Zuleitung überhaupt nicht, und erst nach einer von dem Grade der Schwäche abhängigen Zeit erklang derselbe zunächst leise und bald darauf deutlich. Übrigens traten hierbei individuelle Unterschiede zutage. Noch viel auffälliger als an normalen Personen erschien ein verspätetes Anklingen bei Schwerhörigen, die an Erkrankungen des Mittelohres litten. Manche von diesen hörten eine kräftig tönende Gabel oder eine laut tickende Uhr erst nach 5, 8 oder gar 10 Sekunden; dabei entstand die Empfindung zuweilen an dem einen Ohre auffallend früher als am anderen, so daß bei binotischer Schallperzeption eine Art Echo oder ein Doppelschall beobachtet wurde. Auch ein anderer, durch seine Beiträge zur physiologischen Akustik bekannter Ohrenarzt, Dennert, hat Versuche über die Tondauer oder, wie er es nennt, das Schallquantum angestellt und die Bedeutung desselben für die Hörprüfung erörtert[1]). Er führte die Tonquelle, eine klingende Gabel, vor dem Ohre des Patienten hin und her, so daß sie nur stoßweise vernommen wurde. War sie bei dem betreffenden Rhythmus der Intermissionen für den Hörer abgeklungen, so erschien der Ton immer noch wieder eine längere oder kürzere Zeit von neuem, wenn die Gabel langsamer bewegt wurde und daher jedesmal eine größere Zahl von Schwingungen in den Gehörgang gelangte. Je geringer also die Hörschärfe und je leiser der Ton ist, um so mehr Schwingungsimpulse müssen sich zum Zwecke des Anklingens summieren.

Dem Anklingen steht nun ein Abklingen gegenüber, d. h., wenn der physikalische Ton plötzlich aufhört, so ist damit nicht auch zugleich die Empfindung zu Ende, sondern sie überdauert den Reiz noch eine gewisse Zeit. Helmholtz weist in seiner „Lehre von den Tonempfindungen“ darauf hin, daß die maximale Geschwindigkeit, mit der zwei Töne im Triller abwechseln können, ohne dabei für das Ohr ineinander zu verschwimmen, als eine Art Maßstab für die Dauer des Abklingens anzusehen ist. Denn je kürzer die letztere, um so rascher dürfen offenbar die Töne alternieren. Triller von je zehn Schlägen in der Sekunde seien im größten Teile der Skala scharf und klar auszuführen, aber von *A* abwärts in der großen und Kontraoktave klängen sie schlecht und rauh und beginne die Vermischung. Hieran wäre nicht der Mechanismus der Instrumente schuld, da sowohl beim Triller auf dem Harmonium wie auf dem Violoncell die Töne momentan einsetzen und aufhören; der Grund sei vielmehr in einer Eigentümlichkeit des Ohres zu suchen, der zufolge den tieferen Tönen eine längere Abklingezeit zukäme als den höheren.

Genauere Versuche hat erst Alfred M. Mayer angestellt, und zwar über die Frage, ein wie schnelles Tremolo man in den verschiedenen Oktaven mit dem Ohre noch erfassen kann. Unterbricht man einen Ton durch eine Reihe von Pausen, die in gleichen und nicht zu kleinen Intervallen einander folgen, so hört man ihn, in einzelne Stöße zerlegt, schwebend. Steigert sich die Zahl der Intermissionen in der Zeiteinheit mehr und mehr, so gehen die anfangs distinkten Stöße zunächst in eine scharfe Rauhigkeit über, dann wird diese milder und zuletzt verschwindet sie, so daß der

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **34**, 161, 1893.

Ton wieder glatt erscheint. Mayer suchte nun stets die Grenze der Rauhigkeit gegen die Glätte auf. Die dabei benutzte Versuchsanordnung ähnelt im Prinzip der von Mach zur Bestimmung der Dauerschwelle verwendeten Methode; eine Gabel tönte vor einem Resonator, von dem eine Rohrleitung zum Ohre des Beobachters führte, und eine zwischengeschaltete, mit Ausschnitten versehene, rotierende Scheibe bewirkte, daß der Ton bald durchgelassen, bald abgesperrt wurde. Die letzte[1]) der mehrfachen Publikationen enthält folgendes Resultat. Bezeichnet D (Duration of the residual sensation) die Dauer der Pause zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Tonstößen, die eben kurz genug ist, um nicht mehr als Intermission empfunden zu werden, so ergab sich

für	C	von	64	Schwingungen	D	gleich $\frac{1}{26{,}9}$	Sekunde
„	c	„	128	„	„	„ $\frac{1}{43{,}2}$	„
„	c^1	„	256	„	„	„ $\frac{1}{74{,}4}$	„
„	e^1	„	320	„	„	„ $\frac{1}{87{,}5}$	„
„	g^1	„	384	„	„	„ $\frac{1}{105{,}6}$	„
„	c^2	„	512	„	„	„ $\frac{1}{130}$	„
„	e^2	„	640	„	„	„ $\frac{1}{151{,}2}$	„
„	g^2	„	768	„	„	„ $\frac{1}{171{,}6}$	„
„	c^3	„	1024	„	„	„ $\frac{1}{204}$	„

Aus diesen empirischen Werten ließ sich die allgemeine Formel $D = \left[\frac{33{,}000}{N + 30} + 18\right] \cdot 0{,}0001$ ableiten, worin N die Schwingungszahl bedeutet. Doch fügt Mayer hinzu, daß andere vielleicht zu etwas abweichenden Zahlen gelangen möchten.

In der Tat trifft dies für Urbantschitsch[2]) zu, der aber auch nicht die Frage stellte, wann bei stetiger Verringerung der Pause aus zwei Tonstößen einer wird, sondern wann umgekehrt bei kontinuierlicher Vergrößerung der zunächst einheitliche Ton sich in zwei spaltet, was immerhin einen Unterschied macht. Urbantschitsch verfuhr so. Zwei Röhrchen wurden durch einen gegabelten Schlauch gleichzeitig mit dem Ohre eines Beobachters verbunden (oder auch jedes mit je einem der Ohren). Vor ihren freien Mündungen ward mit Hilfe eines Pendels die Öffnung eines anderen Rohres vorübergeführt, aus welcher der Ton der Schallquelle herausdrang. Der Hörer vernahm den Ton erst durch das eine, dann durch das andere Empfangs-

[1]) Philos. Magaz. (5), **37**, 259 u. 411, 1894; Amer. Journ. of Science (3), **47**, 1 und 283, 1894. — [2]) Pflügers Arch. **25**, 326 ff., 1881.

röhrchen, und zwar je nach der leicht zu berechnenden Geschwindigkeit der Succession entweder als Doppelschlag oder als einzelnen Tonstoß ohne Wahrnehmung der Pause. Die Versuche betrafen freilich nur die Töne *C*, *Dis*, *c* und *dis*, doch zeigte sich in Übereinstimmung mit der Formel Mayers auch hier, daß die oben mit *D* bezeichnete Größe mit wachsender Tonhöhe abnimmt. Wurde der eine Tonstoß dem einen, der zweite dem anderen Ohre zugeleitet, so ergaben sich durchweg höhere Zahlen. Bei monotischem Hören wird also die Spaltung viel eher bemerkt als bei diotischem, womit eine frühere analoge Beobachtung Exners, die Geräusche zum Gegenstande hatte, in Einklang steht.

Man pflegt die Versuche von Mayer und Urbantschitsch dahin auszulegen, daß die höheren Töne rascher abklingen und eben deswegen, wenn keine Pause hörbar werden soll, einander schneller folgen müssen als die tieferen. Indessen erscheint mir diese Folgerung nicht ganz einwandfrei. Stellen wir uns den Vorgang des Anklingens einer Tonempfindung, ihres Verweilens auf der Höhe der Intensität und des darauf folgenden Abklingens graphisch vor, wobei die Zeiten die Abszisse bilden und die Intensitäten durch die Ordinaten dargestellt werden, so bekommen wir eine Kurve, die zunächst ansteigt, dann eine Weile der Abszisse parallel läuft und zuletzt wieder zu ihr heruntersinkt. Nur wenn man in jedem Falle Form und Länge dieses absteigenden Schenkels genau kennt, hat man ein klares Bild von der Art des Abklingens. Bei den Beobachtungen Mayers folgt aber eine Reihe von Tonstößen so rasch aufeinander, daß immer die anklingenden Ordinaten des folgenden mit abklingenden des vorhergehenden zusammenfallen und sich summieren, und die Geschwindigkeit der Succession ist gerade so abgepaßt, daß diese Summierung eine Tonempfindung von gleichmäßiger Intensität ergibt, also eine Kurve, die fortwährend der Abszisse parallel ist oder doch wenigstens keine merklichen Senkungen aufzuweisen hat. Über die Gestalt der Kurvenkomponenten erfährt man auf diese Weise nichts Genaueres. Allenfalls könnte man aus den Angaben von Mayer und Urbantschitsch den Schluß ziehen, daß bei höheren Tönen die Kurve der Empfindungsstärke nach dem Aufhören des Reizes steiler abfalle und des Ausgleiches halber die einzelnen Tonstöße einander zeitlich näher gerückt werden müßten. Allein bei derartigen Versuchen folgen sich die Tonstöße so schnell, daß die Empfindung überhaupt nur mehr oder weniger unvollkommen anklingt. Die doch in erster Linie zu beantwortende Frage, wie eine Tonempfindung abklingt, die eine Zeitlang in der vollen, der Reizgröße entsprechenden Intensität perzipiert worden ist, wird also durch die Mayer-Urbantschitschsche Technik gar nicht berührt. Dazu kommt noch, daß bei Mayers Anordnung neben dem intermittierenden Tone physikalisch die beiden sogenannten Variationstöne entstehen, die den Primärton zwischen sich fassen und mit ihm bzw. miteinander unter geeigneten Bedingungen schweben, wodurch die ganze Beobachtung noch erheblich kompliziert wird. Beiläufig bemerkt, war Mayer sich übrigens durchaus bewußt, daß seine Methode nicht geeignet sei, das Abklingen der Tonempfindungen vollständig klarzustellen.

Abraham und ich [1]) haben mit Hilfe von Löchersirenen untersucht, wie

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **20**, 408, 1899.

rasche Triller man in den verschiedenen Oktaven hören kann. Die Beobachtungen erstreckten sich von der Kontraoktave bis in die viergestrichene und betrafen alle Intervalle von der kleinen Sekunde bis zur Quinte. Sie wurden in der Weise ausgeführt, daß gleichzeitig zwei Löcherkreise angeblasen wurden, in deren jedem Gruppen von offenen mit Gruppen von verschlossenen Löchern alternierten. War eine Serie von Öffnungen des einen Kreises vor dem zugehörigen Anblaserohr vorübergegangen, so folgte in diesem Kreise eine Pause, dafür begann aber sofort im anderen Kreise das Anblasen einer Gruppe von Öffnungen, und so immer abwechselnd. Es ergab sich, daß jeder der beiden Trillertöne eine physikalische Dauer von mindestens 30 σ haben mußte, wenn eine getrennte Wahrnehmung möglich sein sollte. Bei kürzerer Dauer verschmolzen die Töne zu einem rauhen Akkorde. Der Wert von 30 σ gilt für alle geprüften Intervalle und für alle Tonhöhen mit Ausnahme der höchsten und tiefsten, für welche letzteren wir rund 40 σ erhielten. Man kann hiernach in der mittleren Region des Tonreiches überall gleich schnell trillern. Auf den ersten Blick scheint dieses Resultat den Versuchen von Mayer, die Abraham übrigens kontrolliert und bestätigt hat, zu widersprechen. Indessen bleibt zu bedenken, daß wir auch unter anderen Bedingungen experimentierten als jener. Wir ließen nicht Töne von derselben, sondern von verschiedener Höhe aufeinander folgen, und es fanden zwischen den einzelnen Tonstößen keine Unterbrechungen statt. Vor allem aber wurde nicht gefragt, wann bei wachsender Geschwindigkeit der Succession der Eindruck ein einheitlicher wird, sondern wie lange die Töne neben den aus der Vermengung der abklingenden mit den anklingenden Empfindungen entstehenden Akkorden gesondert hörbar bleiben. Immerhin bedürfen die Erscheinungen, die bei raschen Folgen von Tonstößen auftreten, und der Vorgang des Abklingens von Tonempfindungen noch sehr der weiteren Untersuchung[1]). Wenn Abraham[2]) aus unseren gemeinschaftlichen Versuchen die Konsequenz gezogen hat, daß alle Töne, unabhängig von ihrer Höhe, dieselbe Abklingezeit haben, so vermag ich vorderhand diesen Schluß nicht als zwingend anzuerkennen.

h) Nachempfindungen.

Bei einzelnen, hierzu disponierten Personen kommt es nach Urbantschitsch[3]) vor, daß das Abklingen sich erheblich verzögert, und zwar betrifft diese Erscheinung manchmal nur gewisse Töne, in der Regel aber sämtliche. Die Dauer des Nachklingens oder, wie Urbantschitsch es auch nennt, der primären Nachbilder, beläuft sich dabei zuweilen auf 1 bis 2 Sekunden, gelegentlich sogar auf 10 bis 15; ja in einem Falle klang ein hoher Stimmgabelton erst nach 19 Sekunden ab. Häufiger als die primären Nachbilder beobachtete Urbantschitsch[4]) sekundäre, intermittierende. Sie sind dadurch charakterisiert, daß eine abgeklungene Tonempfindung nach einiger Zeit nochmals oder mehrere Male wieder auftaucht. Das Nachbild hat dann meist dieselbe Tonhöhe wie das Vorbild, es kann aber

---

[1]) S. hierzu Marbe, Pflügers Arch. **100**, 551, 1903. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **20**, 417, 1899. — [3]) Pflügers Arch. **25**, 335 f., 1881. — [4]) Ebenda **24**, 585, 1881.

auch höher oder tiefer sein. Die Stärke ist gewöhnlich bedeutend geringer als die des anfänglichen Tones, und folgen mehrere Nachbilder aufeinander, so pflegen sie verschiedene Intensität zu besitzen. Die Nachempfindung tritt in der Regel leise auf und steigt schnell an, wie wenn ein Ton aus weiter Ferne rasch näher käme, worauf sie sich allmählich oder auch plötzlich wieder verliert. Die Dauer der ganzen Erregung vom Verschwinden des objektiven Tones bis zum Ende des letzten Nachbildes beträgt im Durchschnitt 1 bis 2 Minuten, die Dauer des einzelnen Nachbildes 5 bis 10 Sekunden. Die erste Nachempfindung stellt sich gewöhnlich innerhalb der ersten 15 Sekunden nach Entfernung der Tonquelle ein, die zweite nach weiteren 10 bis 20 Sekunden. Indessen kommen in jeder Beziehung beträchtliche individuelle Unterschiede vor. Dies gilt besonders auch von der Zahl der Nachbilder, von denen meist zwei oder drei, unter Umständen aber sogar mehr als acht auftreten.

Neben den detaillierten Angaben von Urbantschitsch finden sich in der Literatur eigentlich nur gelegentliche Notizen über akustische Nachempfindungen. So teilt Stumpf in seiner Tonpsychologie mit, daß er bei langer und starker Einwirkung einer Stimmgabel auf das eine Ohr regelmäßig eine Nachempfindung im anderen Ohre habe, die eine ganze Minute dauern könne, und Preyer erwähnt, daß Schwebungen, namentlich hoher Töne, bei ihm noch am Tage nach den Versuchen entotisch wiederkehrten. Ich selbst kann von mir berichten, daß ich einmal nach anhaltenden binaurealen Beobachtungen, die das durch Telephone auf die Ohren übertragene Geräusch des Neefschen Hammers betrafen, in der folgenden Nacht längere Zeit mit peinlicher Deutlichkeit das charakteristische Telephonsummen im Hinterkopfe hörte. Man kann im Zweifel sein, ob man solche Vorkommnisse noch zu den akustischen Nachbildern rechnen oder als Halluzinationen auffassen soll. Daß aber die ersteren von den Personen, die sie an sich beobachten, etwa mit lebhaften Tonvorstellungen verwechselt würden, weist Urbantschitsch auf Grund positiver Erfahrungen ausdrücklich zurück. Mit Nachschwingungen des Cortischen Organes können andererseits die Nachempfindungen schon deswegen nicht erklärt werden, weil, wenn mehrere Töne gleichzeitig als Nachbild auftreten, Schwebungen und Kombinationstöne dabei vollständig fehlen, eine auch sonst theoretisch interessante Tatsache, die Urbantschitsch wiederholt konstatiert hat. Am wahrscheinlichsten wird die Ursache der akustischen Nachempfindungen in einer erhöhten Erregbarkeit der Neuronen der Hörbahn zu suchen sein, die entweder die Folge einer peripheren Erkrankung oder einer allgemeinen nervösen Reizbarkeit ist, offenbar aber einen Ausnahmezustand bildet, da sonst die akustischen Nachbilder ebenso häufig vorkommen müßten wie die optischen.

i) Ermüdung.

Ein kontinuierlich oder gleichmäßig intermittierend das Ohr treffender Schallreiz von längerer Dauer pflegt nach einiger Zeit nicht mehr perzipiert zu werden. Man hat diese Erscheinung vielfach mit einer Ermüdung des Nerven identifiziert, aber im allgemeinen mit Unrecht. Es handelt sich zumeist lediglich um ein Schwinden der Aufmerksamkeit, das konstanten Empfindungen aller Sinnesgebiete gegenüber leicht eintritt. Wir überhören die

unausgesetzt neben uns tickende Uhr, weil andere Dinge uns beschäftigen, aber wir merken es trotzdem, wenn sie stehen bleibt, was natürlich bei einer wirklichen Betäubung des Ohres ausgeschlossen wäre. Man kann einen Ton, sofern man nur fortwährend oder immer wieder auf ihn achtet, eine halbe Stunde und länger hören, ohne daß er zuletzt schwächer erscheint als am Anfange. Falls dabei tatsächlich eine Herabsetzung der subjektiven Intensität durch Ermüdung des Nerven stattfinden sollte, so ist sie doch zu gering oder geht zu allmählich vor sich, um wahrnehmbar zu sein. J. J. Müller [1]) gibt an, daß eine Stimmgabel weicher, leerer und schwächer klinge, nachdem das Ohr vorher durch das Hören der Oktave und Duodezime erschöpft sei, und Mach hat mehrfach [2]) darauf hingewiesen, daß bei längerer Perzeption eines Tones die Obertöne nach und nach in voller Klarheit hervorträten, weil das Ohr der Beachtung eines einzigen Tones müde würde. Es scheint mir jedoch fraglich, ob man es hierbei wirklich mit einer peripheren und nicht vielmehr mit einer zentralen Ermüdung zu tun hat, und das gleiche muß ich von dem folgenden Versuche Machs [3]) sagen. „Ein Gehilfe schlägt mit dem Hammer auf den Tisch, während wir mit dem Finger beide Gehörgänge zudrücken. Öffnen wir die Gehörgänge 0,5 bis 1 Sekunde nach dem Aufschlagen, so hören wir den Schall neu entstehen. Wir können nach dem Aufschlagen einige Male die Gehörgänge rasch öffnen und schließen und hören bei jedem Öffnen einen Schlag, der natürlich desto schwächer ausfällt, je später das Öffnen nach dem Aufschlagen erfolgt. Dies erklärt sich aus dem im Zimmer fortbestehenden allmählich abnehmenden Schallvorgang, der nur von dem nicht ermüdeten Organ bemerkt wird, oder wenn das Organ kurze Zeit Gelegenheit hatte, sich zu erholen." Ich möchte doch meinen, daß der objektive Nachhall im Zimmer, solange er eine überschwellige Stärke besitzt, auch für gewöhnlich gehört wird und nur im Bewußtsein gegen den ersten stärksten Eindruck zurücktritt.

Ebenso erscheint es mir wenig wahrscheinlich, daß das Gehörorgan durch so kurze und schwache Erregungen, wie verklingende Stimmgabeln sie hervorrufen, zu ermüden sein sollte. In dieser Beziehung ist in der otiatrischen Literatur wiederholt darauf aufmerksam gemacht worden, daß, wenn eine auf den Warzenfortsatz aufgesetzte Stimmgabel für das betreffende Ohr verklungen ist, der Ton nach Abnehmen und Wiederaufsetzen der Gabel auf dieselbe Stelle von der Versuchsperson aufs neue und so eventuell noch mehrmals deutlich gehört wird. Corradi [4]), der sich besonders mit diesem Gegenstande beschäftigt und die eigentümliche Erscheinung nicht nur bei Ohrenkranken, sondern auch bei Gesunden nicht selten gefunden hat, sucht dieselbe damit zu begründen, daß der Hörnerv sich eben von Zeit zu Zeit ausruhen müsse und daß die Ursache ohne Zweifel in den anatomischen und physiologischen Verhältnissen liege. Bei einigen an mir und von mir an zwei gutgeschulten Beobachtern angestellten Versuchen ergab sich, daß die Gabel meistens schon nach dem ersten Erlöschen definitiv unhörbar war; nur zuweilen wurde beim zweiten Aufsetzen wieder eine schwache Spur des Tones

[1]) Ber. d. K. sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Kl., 1871, II bis III, 115 bis 124. — [2]) S. z. B. seine Einleitung in die Helmholtzsche Musiktheorie, 1867, S. 29. — [3]) Lehre von den Bewegungsempfindungen, 1873, S. 58. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **30**, 175, 1890.

vernommen. Eine bestimmte Regel ließ sich nicht finden. Doch habe ich den Eindruck gewonnen, als käme das Wiederauftauchen der Empfindung nur dann vor, wenn beim ersten Male das Urteil „verklungen" aus irgend welchen Gründen, wie Abschweifen der Aufmerksamkeit, Störung durch anderen Schall, Lockerung des Gabelstieles od. dgl., vorschnell abgegeben ist. Die tieferen Gabeln — hohe verklingen für das in Rede stehende Experiment überhaupt zu schnell — schwingen relativ lange, und die Abnahme der Amplitude geht um so langsamer vor sich, je mehr die Vibration sich ihrem Ende nähert. So kommt es, daß der Übergang von der für ein normales Ohr eben noch übermerklichen Amplitude zu der eben schon untermerklichen eine gewisse Weile dauert. Wenn nun schon im Anfang dieser Zeitspanne der Ton für erloschen erklärt wird und das Wiederaufsetzen des Gabelstieles vor dem Ablauf derselben erfolgt, so ist es, zumal bei maximaler Anstrengung der Aufmerksamkeit, begreiflich, daß die Empfindung wieder auftritt. Man braucht darum nicht gleich an Ermüdung und Erholung des Nerven zu denken. Ob und inwieweit diese beiden Faktoren etwa bei pathologischen Zuständen in Betracht kommen, muß hier dahingestellt bleiben.

Wie rasch manche Autoren bereit gewesen sind, in Ermangelung anderer Erklärungen die Ermüdung des Gehörs heranzuziehen, dafür ist auch Dove [1]) ein Beispiel. Er brachte von zwei unisonen Gabeln die eine vor das rechte, die andere vor das linke Ohr und drehte die letztere um ihre Achse, wobei der Ton bekanntlich abwechselnd an Stärke zu- und abnimmt. Das Resultat war nicht bloß ein An- und Abschwellen der Empfindung, sondern der Ton wurde auch alternierend auf der einen und auf der anderen Seite gehört. Dove meinte, daß es sich hierbei um ein Überwiegen des intermittierenden Tones infolge einer gewissen Ermüdung des kontinuierlich gereizten Ohres handle. Die richtige Auslegung ist aber die, daß die gedrehte Gabel zufällig die lautere war und ein diotisch gehörter Ton stets auf die Seite des gerade stärker erregten Ohres verlegt wird. Richtet man den Versuch so ein, daß die rotierende Gabel die leisere ist, so bleibt der schwebende Ton dauernd auf der Seite der ruhenden Gabel.

Rayleigh [2]) fand, daß sein Ohr gegen Töne, die der oberen Hörgrenze nahe kamen, bald ermüdete. Der anfangs laute Ton verschwand nach fünf Sekunden, kehrte aber wieder, wenn das Ohr nur einen Moment mit der Hand verdeckt ward. Ich kann diese Angabe nicht bestätigen. Die, freilich nicht unerträglich lauten, sehr hohen Töne der Galtonpfeife bleiben für mich während der ganzen Beobachtungsdauer deutlich. Allerdings bemerke ich dabei unregelmäßige Intensitätsschwankungen und auch einen gelegentlichen Wechsel der Lokalisation, insofern der Ton manchmal rechts, manchmal links erscheint oder auch durch den Kopf zieht. Ich glaube aber hierfür Druckschwankungen des anblasenden Luftstromes in erster Linie verantwortlich machen zu sollen. Selbst wenn dieselben nur gering sind, können sie schon gewisse qualitative und quantitative Veränderungen der Galtontöne hervorrufen, von denen die ersteren mit einem Lagewechsel der im Beobachtungsraume sich bildenden Knoten und Bäuche verknüpft sind, was eben das Urteil über Richtung und Entfernung der Schallquelle beeinflußt. Auch Scripture

[1]) Pogg. Ann. **101**, 492, 1857 u. **107**, 652, 1859. — [2]) Nature **56**, 285..

und Smith[1]) vermochten sich nicht davon zu überzeugen, daß Ermüdungszustände bei der Beobachtung höchster Töne eine Rolle spielen.

Existieren somit keine durchschlagenden Argumente für die Ermüdbarkeit des Hörnerven einschließlich seiner Endausbreitung durch anhaltende Reize von geringer oder mäßiger Stärke, so liegt andererseits eine Reihe von Mitteilungen vor, welche darin übereinstimmen, daß die Einwirkung eines sehr intensiven Tones zu einer Art Betäubung des Ohres führt. Dieselbe äußert sich in einer Herabsetzung der Hörschärfe für den betreffenden Ton, aber auch nur für diesen, nicht zugleich für andere oder gar alle, was ausdrücklich festgestellt ist und betont zu werden verdient als ein neuer Beweis für die Selbständigkeit, welche den einzelnen Tönen in unserem Gehör eigen ist. Silvanus P. Thompson[2]) fand nach langem Anhören eines sehr lauten Tones, daß das Ohr ermüdete und die Stärke der Empfindung nachließ. Auch wurde derselbe Ton, wenn er gleich nach der Abstumpfung des Ohres schwach angegeben ward, falsch lokalisiert, nämlich zu weit nach der Seite des unermüdeten Ohres. Zu ganz ähnlichen Resultaten ist auch Urbantschitsch[3]) bei einer systematischen Untersuchung des Gegenstandes gelangt. Sein Verfahren war das folgende. Ein starker Stimmgabelton wurde durch einen Schlauch dem einen Ohre 10 bis 15 Sekunden lang zugeleitet und hierauf rasch abgedämpft. Nach dem völligen Verklungensein der Empfindung ward die Gabel vor das andere Ohr gebracht, welches den Ton dann regelmäßig noch mehrere Sekunden hörte. Dabei ist stets darauf geachtet worden, daß nicht etwa eine von vornherein bestehende ungleiche Perzeptionsfähigkeit der Ohren für den betreffenden Ton das Ergebnis fälschte. Hinsichtlich der Dauer der Ermüdung zeigte sich, daß das erschöpfte Ohr nach einigen, meist 2 bis 5, Sekunden sich wieder erholt und dann ebenso fein empfindet wie das nicht überreizte. Bei diotischer Zuleitung eines Tones pflegen viele denselben median im Kopfe zu lokalisieren. Wurde bei solchen Versuchspersonen das eine Ohr vorher in der oben beschriebenen Weise ermüdet, so erschien der Ton im Anfang der binauralen Wahrnehmung auf der Seite des unermüdeten Ohres, um erst allmählich mit zunehmender Erholung des anderen ins Innere des Kopfes zu rücken. Schließlich mag noch erwähnt werden, daß auch Jacobson[4]) bei seinen Patienten für einen und denselben Ton eine geringere Hördauer nach sehr starkem als nach schwachem Anschlag der als Tonquelle dienenden Gabel fand.

II. Von der Klangwahrnehmung.

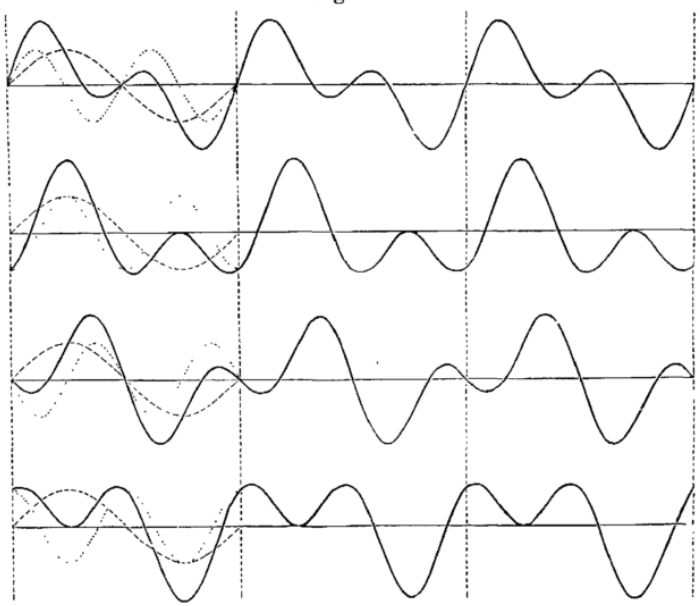
a) Die mathematische und graphische Klangzusammensetzung und -zerlegung.

Der Ton, oder, wie man im Gegensatz zum Klange, der eine Mehrheit gleichzeitiger Töne ist, auch sagt, der einfache Ton ist physikalisch betrachtet ein Schwingungsvorgang, bei welchem jeder Massenpunkt pendelförmig um seine Gleichgewichtslage oszilliert. Ist n die Anzahl der Schwin-

[1]) Stud. from the Yale Psychol. Lab. **2**, 112, 1894. — [2]) Philos. Mag. (5), **12**, 354 f., 1881. — [3]) Pflügers Arch. **24**, 574, 1881. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **19**, 45, 1883.

gungen in der Sekunde und a die Amplitude, so ist zu der beliebigen Zeit t nach dem Beginn der Vibration der Abstand von der Gleichgewichtslage $y = a \cdot \sin 2\pi n t$ [1]). Die Art, wie y sich mit wachsendem t periodisch ändert, kann man in der Weise anschaulich machen, daß man eine schwingende Stimmgabel mittels eines an einem Zinkenende befestigten Schreibstiftes ihre Bewegungsform auf einem unter ihr gleichmäßig vorrückenden Streifen berußten Papieres aufzeichnen läßt. Man kann aber eine entsprechende Kurve, die mit Rücksicht auf obige Gleichung eine Sinuskurve genannt wird, auch ohne jedes physikalische Hilfsmittel rein zeichnerisch konstruieren. Man teilt eine Gerade, welche die Wellenlänge einer Schwingung repräsentiert, in beliebig viele, sagen wir 12, gleiche Teile, errichtet im Endpunkt des ersten Teiles eine Ordinate $y_1 = a \cdot \sin 2\pi \cdot \frac{1}{12}$, im Endpunkt des zweiten eine Ordinate $y_2 = a \cdot \sin 2\pi \cdot \frac{2}{12}$ usw. und verbindet schließlich alle Ordinatenköpfe durch eine Linie, welche eben die gesuchte Sinuskurve ist, wie etwa die gestrichelte Welle in der nachstehenden Fig. 94.

Fig. 94.



Die graphische Darstellung eines Klanges geschieht folgendermaßen. Nehmen wir z. B. an, wir hätten es mit einem solchen zu tun, der sich aus zwei Tönen zusammensetzt, und die Schwingungszahlen dieser Töne ständen im Verhältnis 4 : 5. Man macht dann eine horizontale Gerade gleich der

[1]) Diese Definition des Tones ist nicht erst, wie man öfter angegeben findet, von G. S. Ohm aufgestellt, sondern schon viel älter. Vgl. Ohms Streit mit Seebeck, welcher die Ansicht vertrat, daß auch die Obertöne zur Empfindung des Grundtones beitrügen, in Pogg. Ann. **53** (1841), **59** (1843), **60** (1843), **62** (1844), **63** (1844).

angenommenen Länge der Klangwelle (Klangperiode) und beschreibt über ihr als Abszisse erst vier aufeinanderfolgende Sinuswellen entsprechend dem tieferen Tone und darauf die fünf Sinuswellen des höheren. Alsdann wird für jeden Punkt der Abszisse die algebraische Summe der in ihm zusammenfallenden beiden Tonordinaten aufgesucht und als Lot aufgetragen. Die durch die freien Endpunkte aller dieser Lote gezogene krumme Linie ist die Klangkurve. Dieselbe wird demnach durch eine algebraische Addition, durch Superposition der Tonkurven gewonnen.

Bei dieser Konstruktion ist nun vorausgesetzt, daß einerseits die Anfangspunkte der beiden Tonschwingungen, andererseits der Endpunkt der vierten Welle des tieferen und der der fünften des höheren Tones zusammenfallen, daß also Phasengleichheit besteht. Dies ist aber ein spezieller Fall und der allgemeinere der, daß ein Phasenunterschied, eine Phasenverschiebung stattfindet, indem der eine Ton um irgend einen Bruchteil einer Schwingungsdauer früher oder später einsetzt als der andere. Fig. 94 zeigt die Komposition zweier Töne gleicher Amplitude, deren Schwingungszahlen sich verhalten wie 1 : 2, für die Gangunterschiede 0, $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$ der Länge der kürzeren Welle dargestellt. Für die Zusammensetzung ist immer das Prinzip der Superposition in gleicher Weise maßgebend. Man sieht aber, daß die resultierende Wellenform sehr von der Phasendifferenz abhängig ist, und wenn man bedenkt, daß außerdem die Anzahl der Partialtöne eines Klanges und die Wahl der einzelnen Amplituden beliebig ist, so wird verständlich, daß unendlich viele verschiedene Klangkurven möglich sind.

Der Mathematiker Fourier[1]) hat nun gezeigt, daß jede Kurve von der Abszissenlänge l, welche Gestalt sie auch im übrigen haben möge, in einer ganz bestimmten und nur in dieser einzigen Weise zerlegbar ist in eine Reihe von Sinuskurven, deren Wellenlängen gleich l, $^1/_2 l$, $^1/_3 l$ usw. sind und deren Amplituden und Gangunterschiede sich von Fall zu Fall nach der Methode der unbestimmten Koeffizienten berechnen lassen (wobei einzelne dieser Größen natürlich auch gleich Null sein können). Wie man also jederzeit aus einer gegebenen Anzahl einfacher Teiltöne auf dem Papier eine Klangwelle zu bilden vermag, so ist man mittels der Fourierschen Analyse, auf deren Einzelheiten hier nicht eingegangen werden soll, auch imstande, aus der gegebenen Klangwelle deren Komponenten wieder zu ermitteln.

b) Die physikalische Klangzerlegung.

Das Theorem von Fourier ist für verschiedene physikalische Probleme von Wichtigkeit, und gerade für die Akustik hat es nicht etwa bloß die Bedeutung einer mathematischen Fiktion, sondern einen sehr wesentlichen reellen Sinn. In einem unser Ohr treffenden Klangwellenzuge sind nämlich faktisch alle diejenigen Teiltöne und nur diese als pendelförmige Komponenten enthalten, welche auch die mathematische Analyse ergibt. Man kann sich hiervon unter Benutzung diverser physikalischer Hilfsmittel überzeugen, bei denen die Erscheinung des Mitschwingens oder der Resonanz zur Wirkung kommt. Man hebe etwa die Dämpfung eines Klaviers auf und singe mit kraftiger Stimme auf eine nicht zu hohe Note einen Vokal gegen das Instrument, so

[1]) Théorie analytique de la chaleur, Paris 1822.

gibt dasselbe ihn deutlich zurück. Der von dem Sänger erzeugte Klang, denn ein solcher ist ein Vokal in jedem Falle, wird von dem Saitensystem des Klaviers in seine Teiltöne zerlegt, indem jede Saite durch die ihrer Schwingungszahl entsprechende pendelförmige Komponente der Klangwelle in Mitschwingungen versetzt wird, und da die Saiten ihre Töne wieder auf die Luft übertragen, so entsteht aus der Kombination der Vokalklang aufs neue. Auch Stimmgabeln auf Resonanzkasten werden durch gleichgestimmte Töne zu hörbarem Schwingen gebracht und können noch eine ganze Weile nach dem Erlöschen des erregenden Tones nachklingen. Der Nutzen der Resonanzkasten ist ebenfalls auf das Prinzip des Mittönens zurückzuführen, insofern abgegrenzte Lufträume je nach ihrer Größe durch die Einwirkung gewisser Töne in Schwingungen von fast reiner Pendelform geraten und damit jene Töne verstärken. Helmholtz konstruierte cylindrische oder konische Röhren und Hohlkugeln [1]), die mit einer äußeren Mündung und einer zweiten zur Einführung in den Gehörgang bestimmten Öffnung versehen waren und die, unter dem Namen Resonatoren bekannt, seither dem Fortschritte der Akustik die wesentlichsten Dienste geleistet haben. Jeder solche Resonator hat eine Reihe von Eigentönen, von denen der tiefste ganz besonders intensiv mit einem in seiner Nähe hervorgebrachten Tone von gleicher Höhe mitklingt. Verschließt man das eine Ohr und steckt in das andere einen Helmholtzschen Resonator, so hört man die meisten in der Umgebung vorhandenen Töne sehr gedämpft. Sobald aber der Grundton des Resonators angegeben wird, dringt er mit großer Stärke ins Ohr. Es läßt sich übrigens auch, ohne daß das Gehör zu Hilfe genommen wird, die Zusammensetzung eines Klanges aus seinen Teiltönen physikalisch demonstrieren. So kann man die eine Öffnung eines Resonanzraumes mit einer Membran überspannen und deren Mitschwingen mit einem von außen kommenden Tone durch aufgestreuten Sand, der in Bewegung gerät, sichtbar machen. Oder man verbindet einen Resonator mit einer manometrischen Kapsel nach R. Koenig [2]), zündet deren Gasbrenner an und beobachtet in einem rotierenden Planspiegel das Bild der Flamme, die im Tempo der Verdichtungen und Verdünnungen der Luft im Resonator auf und nieder zuckt.

c) Die physiologische Klangzerlegung.

Für die ganz tiefen Töne pflegt man keine Resonatoren zu verfertigen, da sie wegen ihrer gewaltigen Dimensionen allzu unhandlich wären. Andererseits reichen die Resonatoren infolge der raschen Verkleinerung ihrer Maße mit wachsender Tonhöhe nur etwa bis zur fünfgestrichenen Oktave. Innerhalb dieser Grenzen kann man aber mittels der Resonatoren alle Klänge in ihre sämtlichen Teiltöne, sofern deren Intensität nicht exzessiv gering ist, zerlegen. Streng theoretisch genommen, bedarf man indessen überhaupt keines Apparates zum Zwecke der Klanganalyse, da das normale Ohr befähigt ist, dieselbe selbständig auszuführen, eine Tatsache, die zu den wichtigsten der physiologischen Akustik gehört. Die praktische Beobachtung lehrt freilich, daß nicht jedes Ohr jeden beliebigen Klang vollständig in seine Partial-

[1]) Lehre von den Tonempfindungen (5), S. 73. — [2]) Vgl. R. Koenig, Quelques expériences d'acoustique, 7, 47 ff., Paris 1882.

töne aufzulösen vermag, aber wo es mißlingt, handelt es sich entweder seitens des Beobachters um einen Mangel an Fähigkeit bzw. Übung, die physiologisch getrennten Empfindungen auch im Bewußtsein auseinander zu halten, oder um besondere in der Aufgabe liegende Schwierigkeiten. Manche Klänge sind bequem zu analysieren, wie beispielsweise ein Zweiklang, der aus einem sehr tiefen und einem sehr hohen einfachen Ton besteht, andere schwer. In letzterer Hinsicht kommt zunächst in Betracht, daß die lauteren Teiltöne sich meistens der Aufmerksamkeit mehr aufdrängen als die leiseren, falls diese nicht etwa völlig unterdrückt werden. Zweitens macht das Schwingungsverhältnis gleichzeitiger Töne einen wesentlichen Unterschied für das Heraushören aus einem Klange. Nach Stumpf geht der Grad der „Verschmelzung" zweier Töne dem Grade ihrer Konsonanz parallel. Demgemäß sind Partialtöne, die im Oktaven- oder Quintenverhältnis stehen, nicht so leicht voneinander zu trennen wie die dissonanten selbst bei größerer Stärke. Endlich verdient noch hervorgehoben zu werden, daß das Gehör bei der Klangzerlegung versagt, wo die Höhendifferenz der Teiltöne unter eine gewisse Grenze sinkt. Die Unterschiedsempfindlichkeit für zwei gleichzeitige Töne ist durchweg erheblich weniger entwickelt als diejenige für aufeinanderfolgende. Im Anschluß an vereinzelte Angaben früherer Autoren habe ich mit A. Guttmann[1]) diesen Gegenstand einer eingehenderen Prüfung unterzogen, welche die Tonregion zwischen G_1 und d^3 betraf. Es ergab sich für bestens geübte, mit Tönen in jeder Beziehung vertraute Beobachter, daß im mittleren Teile der musikalischen Skala zwei Töne nur dann als zwei und nicht mehr als ein einziger aufgefaßt werden, wenn ihr Abstand mehr als 10 bis 20 Schwingungen beträgt. In der eingestrichenen Oktave scheint die Unterschiedsempfindlichkeit am größten zu sein. Nach der Tiefe zu findet jedenfalls ein deutliches Steigen der Schwelle statt, und in der zweigestrichenen Oktave zeigt die Unterschiedsempfindlichkeit wenigstens eine gewisse Tendenz zur Abnahme. Jenseits des d^3 muß diese sich dann rasch vergrößern, denn Stimmgabelzweiklänge aus der oberen Hälfte der vier- und dem Anfange der fünfgestrichenen Oktave, wie 3200 + 3840, 3840 + 4000, 4000 + 4800 und ähnliche, erscheinen durchaus als ein Ton. Detaillierte Beobachtungen bezüglich dieser höheren und der ganz hohen Töne fehlen indessen noch. Unsere Versuche wurden mit möglichst obertonfreien Klangquellen angestellt. Experimentiert man mit tiefen Zungentönen, so erweist sich die Unterschiedsempfindlichkeit als größer, weil offenbar die Unterscheidung der beiderseitigen benachbarten höheren Obertöne die Beurteilung erleichtert.

d) Die Klangfarbe.

Durch die physiologische Klangzerlegung, eventuell unter Zuhilfenahme von Resonatoren, kann sich jeder ohne große Mühe davon überzeugen, daß der sog. „Ton", welchen man hört, wenn eine Stimmgabel oder eine Klaviersaite angeschlagen, eine Violinsaite gestrichen oder eine Taste des Harmoniums niedergedrückt wird, kein einfacher Ton, sondern ein Klang ist. Es gibt meines Wissens zurzeit überhaupt kein musikalisches Instrument, das

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **32**, 87, 1903.

imstande wäre, Wellen von reiner Pendelform auszusenden; immer wird ein mehr oder weniger zusammengesetzter Klang produziert.

Ein solcher Klang besteht nun aus dem Grundtone, welcher der tiefste sowie meist der lauteste Teilton ist, weshalb er auch zur Bezeichnung der Tonhöhe des Ganzen benutzt wird, und dessen Obertönen. Letztere zerfallen in harmonische und unharmonische, von denen uns hier nur die erstgenannten interessieren. Dieselben haben die Eigenschaft, daß ihre Schwingungszahlen Vielfache von der Schwingungszahl des Grundtones sind, und zwar derart, daß der erste Oberton oder zweite Partialton die Schwingungszahl $2n$ hat, wenn n die Schwingungszahl des Grundtones ist, der zweite Oberton oder dritte Partialton die Schwingungszahl $3n$ und so fort. Der erste Oberton ist also die Oktave des Grundtones, der zweite die Duodezime, der dritte die Doppeloktave, der vierte die zu dieser gehörige Durterz usw. Bei den Zungenpfeifen ist die Reihe der Obertöne relativ sehr lang, bei den Klängen der Stimmgabeln, der angeblasenen Flaschen und der weiten gedackten Pfeifen nur kurz. Bei den meisten Instrumenten folgen die Obertöne lückenlos nach der Ordnungszahl aufeinander, in anderen Fallen dagegen enthält der Klang nur die ungeradzahligen Teiltöne.

So ist die Zahl, die Reihenfolge und auch die Stärke, in welcher die Obertöne den Grundton begleiten, bei den verschiedenen Tonmitteln verschieden. Jede Klangquelle hat in dieser Beziehung ihre spezifische Eigentümlichkeit, und gerade hierauf sind von Helmholtz die Unterschiede der Klangfarben zurückgeführt worden. Er hat die Klänge der wichtigsten Instrumente hinsichtlich ihrer Zusammensetzung eingehend untersucht und aus seinen Resultaten die folgenden Regeln [1]) als im allgemeinen gültig abgeleitet.

1. Einfache Töne — nach unseren heutigen Kenntnissen würden wir richtiger sagen: möglichst obertonfreie Klänge — wie die der Stimmgabeln mit Resonanzröhren und der weiten gedackten Orgelpfeifen, klingen sehr weich. Sie sind ohne alle Rauhigkeit, aber unkräftig und, wenn sie tief sind, dumpf.

2. Klänge, welche von einer Reihe ihrer niederen Obertöne bis etwa zum sechsten in mäßiger Stärke begleitet werden, sind klangvoller, musikalischer, reicher, prächtiger, aber durchaus wohllautend und weich. Hierher gehören die Klänge des Klaviers und der offenen Orgelpfeifen sowie die weicheren Pianotöne der menschlichen Stimme und des Horns, welche letzteren den Übergang zu den Klängen mit hohen Obertönen bilden, während die Flöten sich den einfachen Tönen nähern.

3. Wenn nur die ungeradzahligen Obertöne vorhanden sind, wie bei den engen, gedackten Orgelpfeifen, den in der Mitte angeschlagenen Klaviersaiten und der Klarinette, so bekommt der Klang einen hohlen oder bei einer größeren Zahl von Obertönen einen näselnden Charakter. Überwiegt der Grundton an Stärke, so ist der Klang voll; leer dagegen, wenn jener an Stärke den Obertönen nicht hinreichend überlegen ist. So ist der Klang weiter, offener Orgelpfeifen voller als derjenige von engeren, der Klang der Saiten voller, wenn sie mit Klavierhämmern angeschlagen, als wenn sie gerissen werden,

[1]) Lehre v. d. Tonempf. (5), S. 192.

der Ton der Zungenpfeifen mit passendem Aufsatz voller als ohne einen solchen.

4. Wenn die höheren Obertöne jenseits des sechsten oder siebenten sehr deutlich sind, so wird der Klang rauh und scharf. Der Grad der Schärfe kann verschieden sein; bei geringerer Stärke beeinträchtigen die hohen Obertöne die musikalische Brauchbarkeit nicht wesentlich, sind im Gegenteil günstig für die Charakteristik und Ausdrucksfähigkeit der Musik. Von dieser Art sind besonders wichtig die Klänge der Streichinstrumente, ferner die meisten Zungenpfeifen, Oboe, Fagott, Harmonium und menschliche Stimme. Die rauheren, schmetternden Klänge der Blechinstrumente sind außerordentlich durchdringend und machen deshalb mehr den Eindruck großer Kraft als ähnliche Klänge von weicherer Klangfarbe, weshalb sie zwar an sich weniger zur künstlerischen Musik geeignet, aber sehr wirkungsvoll im Orchester sind.

Den klassischen Untersuchungen von Helmholtz verdanken wir somit die Einsicht in die physikalischen Bedingungen für die Unterschiede der Klangfarben. Wir sind jetzt imstande, schon aus der mathematischen Zerlegung einer Klangkurve mit ziemlicher Sicherheit zu ersehen, ob wir es mit einem weichen oder scharfen, einem vollen oder hohlen Klange zu tun haben würden, falls das Ohr ihn vernähme. Warum aber eine bestimmte Art der Zusammensetzung dem Klange gerade den Charakter des Vollen, eine andere den des Leeren verleiht, warum allein der Mangel der geradzahligen Teiltöne einen näselnden Eindruck hervorruft: diese und ähnliche Fragen sind von Helmholtz nicht in den Kreis seiner Betrachtungen gezogen worden. Dagegen hat Stumpf[1]) die Wichtigkeit der hier sich darbietenden psychologischen Probleme hervorgehoben und dieselben einer gründlichen Erörterung unterzogen.

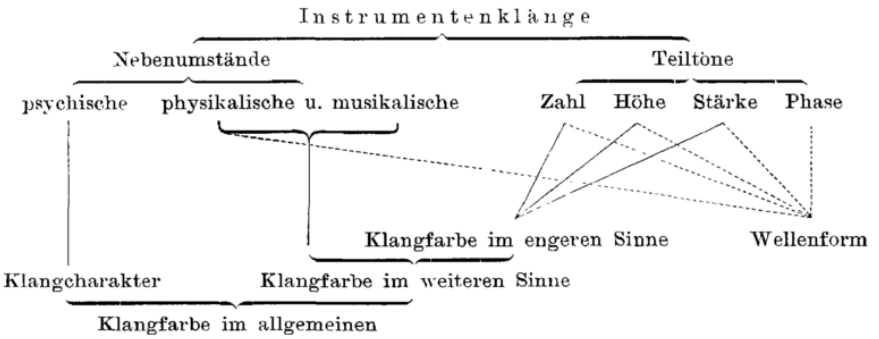
Die zur Bezeichnung von Klangfarben üblichen Ausdrücke sind sehr zahlreich und mannigfaltig. Man spricht von milden, weichen, schmelzenden, von harten und rauhen Klängen, von vollen, breiten, dicken, spitzen, dünnen und leeren. Man unterscheidet glänzende, markige, dröhnende, prächtige, feurige, majestätische Klänge von trüben, hölzernen, trockenen, düsteren, idyllischen usw. Vielfach handelt es sich bei derartigen Benennungen um assoziierte Vorstellungen und Gefühle, und alles hierher Gehörige trennt Stumpf unter dem zusammenfassenden Begriff des Klangcharakters von der eigentlichen Klangfarbe ab. Die letztere kann man dann wieder in einem engeren und im weiteren Sinne auffassen. Was Stumpf unter der Klangfarbe im engeren Sinne versteht, deckt sich mit dem, was Helmholtz die musikalische Klangfarbe nannte und auf die Zusammensetzung des Klanges aus Teiltönen zurückführte. Die Klangfarbe im weiteren Sinne umfaßt nach Stumpf außer der Klangfarbe im engeren Sinne noch eine Reihe charakteristischer Merkmale der Instrumente, die auch Helmholtz bereits annähernd vollständig angegeben hat, nämlich die spezifische Art und Dauer des An- und Ausklingens, die begleitenden blasenden, zischenden, sausenden, kratzenden Geräusche, welche sehr wesentlich zur Erkennung der Instrumente beitragen, gewisse eigentümliche Unterschiede der

[1]) Tonpsychologie **2**, 514 bis 549, 1890.

Höhenlage und Klangstärke, Höhe- und Stärkeschwankungen und endlich besondere melodische, rhythmische, auch wohl harmonische oder modulatorische Wendungen. Was die Klangfarbe im engeren Sinne betrifft, so greift Stumpf zum Zweck der psychologischen Erklärung auf die Tonfarben zurück. Der Klang besteht aus Teiltönen; jeder Teilton hat seine eigene Tonfarbe, und der Komplex aller dieser Tonfarben macht eben das aus, was wir die Klangfarbe zu nennen pflegen. Erinnern wir uns hier des früher über die Tonfarben Mitgeteilten, so begreift sich die erste Helmholtzsche Regel ohne weiteres; nur ist hinzuzufügen, daß sie für die einfachen Töne der höchsten Oktaven nicht gilt und überhaupt die Farbe einfacher Töne sich mit der Höhe stetig ändert. Bezüglich der übrigen Regeln ist sofort klar, daß durch Hinzufügung immer zahlreicherer Obertöne ein Klang immer kräftiger, markiger und mit zunehmender Höhe der Teiltöne immer heller werden muß. Je stärker ferner der Grundton und je tiefer seine Lage, um so mehr wird er dem Klange eine gewisse Breite und Fülle verleihen. Hohe Grundtöne mit ihren noch höheren Obertönen müssen dagegen immer helle und spitze Klänge geben bzw. bei genügender Stärke einen gellenden Eindruck machen, weil eben jeder einzelne Teilton schon an sich in dieser Richtung wirkt.

Wird von verschiedenen Instrumenten ein und derselbe Grundton produziert und ist er so hoch, daß sämtliche oder die meisten Obertöne über die obere Hörgrenze hinaus fallen oder ihr wenigstens nahe kommen, so ist zu erwarten, daß die Klangfarbenunterschiede verschwinden, weil die Differenzen in den Verhältnissen der Partialtöne sich unter diesen Umständen ausgleichen. In der Tat hat Preyer[1]) gefunden, daß von vielen guten Beobachtern keiner imstande war, die Zungentöne c^4 und c^5 von den gleichen Gabeltönen zu unterscheiden, solange die Stärke nicht sehr bedeutend war. Wurde aber das c^4 mit großer Intensität angegeben, so war der Unterschied eben merklich; offenbar weil dann der zweite Teilton bei der Zunge deutlicher wurde als bei der Gabel.

Im Anschlusse an Stumpfs psychologische Zergliederung des so komplizierten Begriffes der Klangfarbe, die auf lange Zeit hinaus maßgebend bleiben wird, können wir uns den Zusammenhang der hier in Betracht kommenden Dinge durch ein einfaches Schema, wie folgt, übersichtlich machen.



[1]) Akustische Untersuchungen, Jena 1879, S. 21.

Im ganzen wird keine weitere Erläuterung nötig sein. Nur auf einen Punkt ist besonders aufmerksam zu machen, nämlich auf den Umstand, daß keine Beziehung zwischen der Klangfarbe und den Phasenverhältnissen der Teiltöne besteht, während letztere ja die Wellenform des Klanges sehr wesentlich beeinflussen.

Die Abhängigkeit der Klangwellenform von den Phasenverhältnissen ist nur eine Folge der algebraischen Summierung der Partialtonwellen. Diese wird aber bei der Klangzerlegung durch das Gehör, wie ja die Beobachtung lehrt, wieder rückgängig gemacht, und die Teiltöne fließen selbständig nebeneinander her. Damit hört die gegenseitige Beeinflussung hinsichtlich der Phasen auf, und da es auch für die Empfindung des einzelnen einfachen Tones irrelevant ist, ob zuerst eine Verdichtung oder eine Verdünnung der Luft das Trommelfell trifft, so drängt sich a priori der Schluß auf, daß der Klangeindruck schlechthin unabhängig von den Phasenverhältnissen ist und daß Klänge von verschiedener Wellenform, sofern diese Verschiedenheit nur auf Phasenverschiebungen beruht, identische Wahrnehmungen ergeben.

Helmholtz[1]) hat indessen noch einen besonderen experimentellen Beweis hierfür beigebracht, wohl hauptsächlich mit Rücksicht auf die entscheidende Bedeutung des Gegenstandes für seine später zu erörternde Theorie des Hörens. Er kombinierte zum Zweck der Zusammensetzung von Klängen aus möglichst einfachen Tönen eine Anzahl elektrisch angetriebener Stimmgabeln mit verschließbaren Resonanzröhren. Waren alle Gabeln in Gang und alle Röhren geschlossen, so ließ sich hochstens ein leises Summen vernehmen; wurden aber diese oder jene Resonatoren geöffnet, so konnte man dadurch Klänge von verschiedener Färbung hervorbringen. Helmholtz benutzte den Apparat in erster Linie zur Synthese künstlicher Vokale. Er überzeugte sich aber mit Hilfe desselben auch davon, daß es für die Klangfarbe gleichgültig war, ob man eine bestimmte Schwächung einzelner Teiltöne durch Entfernung der Resonanzröhren oder durch entsprechenden Verschluß derselben bewirkte. In ersterem Falle fand nur eine Intensitätsverminderung, im zweiten zugleich eine Phasenverschiebung statt, die mithin zur Klangveränderung nicht merklich beitrug. Hiergegen ist, vielleicht nicht ganz mit Unrecht, eingewendet, daß mit der Verengerung der Resonatormündung eine kleine Tonhohenverstimmung eintritt und daß, wenn diese nicht als Änderung der Klangfarbe empfunden wurde, auch ein Einfluß der Phasenverschiebung überhört sein könne, zumal ja zwischen je zwei Beobachtungen wegen der Umstellungen einige Zeit verging. Es war darum sehr erwünscht, daß Hermann[2]) Versuche gleicher Tendenz auf ganz andere Weise anstellte. Er bediente sich des Edisonschen Phonographen und ließ mit Vokalen oder Musikstücken bedeckte Cylinder mit gleicher Geschwindigkeit wie bei der Aufnahme, aber in entgegengesetzter Richtung rotieren, wodurch die zeitliche Folge des akustischen Vorganges sich umkehrte und die Phasen „vollständig durcheinandergeworfen wurden". Die Klangfarbe erwies sich trotzdem als absolut unverändert. Außer diesem Abszissenumkehrungsversuch wurde auch noch eine Ordinatenumkehrungsprobe gemacht, die das gleiche Resultat

[1]) Lehre von den Tonempfindungen (5), S. 194 ff. — [2]) Pflügers Arch. 56, 467, 1894.

hatte. Hieraus und aus einigen anderen Beobachtungen folgert Hermann mit der größten Bestimmtheit, daß die Phasenverhältnisse an sich keinen Einfluß auf das Gehor haben, ein Schluß, den neuerdings Lindig[1]) vollkommen bestätigt hat. Dieser Autor arbeitete mit einer passend abgeänderten Weber-Karstenschen Telephonsirene, welche es gestattete, alle in den Klängen enthaltenen Obertone hinsichtlich ihrer Zahl und Phase genau festzustellen, sowie die verschiedensten Intensitäts- und Phasenverhältnisse zu erzielen. Es ergab sich, daß Phasenverschiebungen nur dann Klangfarbenunterschiede zur Folge haben, wenn gewisse Obertone, die in genügender Stärke vorhanden sein müssen, sich dabei durch Interferenz gegenseitig verstärken oder vernichten. Der Phasenwechsel bedingt also in diesen Fällen zunächst eine Intensitätsänderung von Teiltönen und diese erst die Veränderung der Klangfarbe.

Auf Interferenz ist auch die periodische Färbungsschwankung mancher schwebender Klänge zurückzuführen. Erklingen zwei nahezu gleich hohe Grundtöne zusammen, so treten immer während des Minimums der Schwebung die Obertöne relativ hervor, wobei der Klang heller wird. Bilden die Grundtöne eine verstimmte Oktave, so schwebt der höhere mit dem ersten Obertone des tieferen. Der tiefere überwiegt dann im Gesamteindruck zur Zeit des Schwebungsminimums, der Zusammenklang seiner Oktave mit dem höheren Primärton aber zur Zeit des Maximums. Im ersteren Falle erscheint der Klang etwas dumpfer, im letzteren etwas schärfer.

Die Einflußlosigkeit der Phasenverhaltnisse als solcher auf die Klangfarbe ist meines Erachtens derart sichergestellt, daß es mir überflüssig erscheint, auf die dagegen geltend gemachten Einwendungen ausführlich einzugehen. Nur gewisse Versuche von R. Koenig[2]) mögen hier ihres historischen Interesses wegen erwähnt werden. Derselbe zeichnete eine Anzahl Klangkurven, die sich nur durch die Phasenverhältnisse unterschieden, schnitt sie in Blech aus, brachte die in Cylinderform über die Fläche gebogenen Blechstreifen auf eine gemeinsame rotierende Achse und blies die Kurven durch einen länglichen Spalt an. Den aus dieser Konstruktion sich ergebenden Apparat nannte er Wellensirene. Er fand die Klangfarbe der Kurven verschieden und führte dies auf die Phasenunterschiede zurück. Seine Beobachtung ist nun zwar richtig, nicht aber die Begründung. Denn nachdem schon Hermann[3]) darauf hingewiesen hatte, daß für die Zusammensetzung der beim Anblasen der Wellensirene in der Luft entstehenden Klänge nicht nur die graphische Form der Kurve, sondern auch das Richtungsverhältnis zwischen Blechkante und Spalt maßgebend sei, erbrachte Stumpf[4]) in einer Untersuchung über die Ermittelung von Obertönen den experimentellen Beweis, daß die einzelnen Klänge der Wellensirene sich in bezug auf die Intensität der Teiltöne wesentlich unterscheiden und eben dadurch die Klangfarbendifferenzen veranlaßt werden. Koenig hat seine Sirene noch in der Weise modifiziert, daß eine Reihe in Blech ausgeschnittener Sinuskurven gleichzeitig mit beliebigem Phasenverhältnis angeblasen werden konnten. Dem Phasenwechsel entsprach

[1]) Über den Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe. Dissert. Kiel 1902. — [2]) Wiedemanns Ann. **57**, 339, 1896 (woselbst auch die ältere Literatur); ferner ebenda S. 555. — [3]) Pflügers Arch. **56**, 468 ff., 1894. Vgl. auch Wiedemanns Ann. **58**, 391, 1896. — [4]) Wiedemanns Ann. **57**, 678, 1896.

dabei auch eine Klangfarbenveränderung. Dieselbe ist indessen offenbar im Sinne der von Lindig gegebenen Erklärung aufzufassen, da die sinusförmigen Blechkurven, wie Stumpf in der eben erwähnten Arbeit konstatierte, keineswegs einfache Grundtöne, sondern auch diverse Obertöne hören lassen.

III. Von den sekundären Klangerscheinungen.

Wenn zwei Töne zugleich erklingen, so treten unter geeigneten Umständen infolge ihres Zusammenwirkens außer den ihnen selbst entsprechenden Empfindungen noch andere Gehörswahrnehmungen auf. Das gleiche ist der Fall, wenn nur ein einziger Ton angegeben wird, seine Amplitude aber nicht konstant bleibt oder wie beim Verklingen stetig abnimmt, sondern periodischen Schwankungen unterliegt. Wir wollen derartige Nebenwahrnehmungen als sekundäre Klangerscheinungen und die dieselben veranlassenden Töne, wie üblich, als Primärtöne bezeichnen.

a) Die Schwebungen.

Haben zwei dem Ohre zusammen dargebotene Tone genau die gleiche Schwingungszahl, so unterscheidet sich die Gesamtempfindung von der des einzelnen Tones nur durch die je nach den Phasenverhältnissen größere oder geringere Stärke. Wird aber der eine Ton gegen den anderen verstimmt, so resultiert ein eigentümliches und sehr eindringliches Phänomen. Die Gleichmäßigkeit der Empfindung hört auf, und an ihre Stelle tritt ein rhythmischer Intensitätswechsel. Ist die Tonhöhendifferenz sehr gering, so erscheint derselbe als ein langsames An- und Abschwellen; der Ton wogt oder schwebt gleichsam auf und nieder. Daher die Bezeichnung Schwebungen, statt deren übrigens auch die Ausdrücke Schläge und Stöße benutzt werden, was darauf zurückzuführen ist, daß raschere Schwebungen eher an Hammerschläge als an eine Wellenbewegung erinnern.

Die Anzahl der Schwebungen in der Sekunde ist gleich der Schwingungszahlendifferenz der Primärtöne. Wenn man also zwei Töne zunächst genau unison stimmt und dann den einen schrittweise erhöht oder vertieft, so wächst auch die Frequenz der Schwebungen entsprechend, und es läßt sich die Veränderung studieren, welche der psychische Eindruck der Schwebungen mit zunehmender Schnelligkeit derselben erfährt. Man kann zu solchen Versuchen Stimmgabeln benutzen, in deren eine Zinke ein Stift mittels eines Schraubengewindes so eingesetzt ist, daß er einwärts oder auswärts geschroben und dadurch die Gabel erhöht oder vertieft werden kann. Oder man bedient sich eines der bekannten Appunnschen Tonmesser, die eine große Reihe von Zungen enthalten, deren Tonhöhen um je 2 oder 3 beziehungsweise 5 Schwingungen differieren. Auch Pfeifen mit verschieblichem Stempel sind zu dem in Rede stehenden Zwecke sehr nützlich [1]). Die zunächst sich erhebende Frage nach der längsten noch hörbaren Schwebung ist verschieden beantwortet worden. A. Mayer hat noch eine Schwebung von 8, Rayleigh

[1]) L. W. Stern hat kürzlich einen aus solchen kombinierten, zu vielen Beobachtungen sehr brauchbaren Apparat unter dem Namen „Tonvariator“ beschrieben (Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 30, 422, 1902).

sogar solche von 24 Sekunden Dauer wahrgenommen, und letzterer meinte, daß man noch langsamere hören könne. In der Tat fand denn auch Lindig im Verlaufe gewisser Versuche mit verstimmten Oktaven[1]), daß die Schwebungen bis zu einer Dauer von drei Minuten merklich waren.

So langsame Schwebungen noch als solche zu erkennen, ist natürlich im allgemeinen äußerst schwierig. Dagegen sind die Stöße sehr deutlich und leicht mit dem Ohre zu verfolgen, wenn etwa einer bis sechs auf die Sekunde kommen. Sie lassen sich dann ohne Mühe zählen. Steigt ihre Zahl auf 20 oder 30, so ist letzteres freilich nicht mehr möglich, aber man hat immerhin noch den Eindruck einer Folge von Tonstößen. Dabei ist jedoch der Klang wirr und rauh. Bei weiterer Zunahme der Frequenz der Schwebungen bleibt diese Rauhigkeit charakteristisch, nimmt indessen allmählich mehr und mehr ab und verschwindet schließlich gänzlich, womit dann die andere Grenze für die Wahrnehmbarkeit von Schwebungen hinsichtlich ihrer Zahl erreicht ist.

Der Charakter der Rauhigkeit richtet sich nach der Geschwindigkeit der Stöße. Langsamere Schwebungen geben eine gröbere Art von Rauhigkeit, ein Rollen, Knarren, Rasseln; raschere geben eine feinere und schärfere Rauhigkeit, ein Schwirren oder Zwitschern. Der letztere Ausdruck ist namentlich für die Stöße sehr hoher Töne bezeichnend. Helmholtz hebt in seiner Beschreibung der Schwebungen[2]) hervor, daß dieselben ganz den gleichen Eindruck machen wie ein dem Ohre mit entsprechender Frequenz intermittierend zugeleiteter Ton und bezieht die Unterschiede in der Empfindung lediglich auf die Unterschiede der Schnelligkeit. Dagegen äußert Stumpf[3]), daß ihm in den Fällen von stärkeren oder schnelleren Schwebungen noch gewisse Nebenerscheinungen hinzuzutreten schienen, nämlich hauptsächlich Geräusche, welche nach seiner Meinung nicht völlig auf Tonempfindungen oder Modifikationen solcher zurückführbar seien, dann aber auch äußerst hohe Töne, die vor allem an dem Schwirren und Zwitschern beteiligt wären. Besonders deutlich fand er dies bei der Beobachtung des von Zungen erzeugten Zweiklangs $c^2 d^2$. Es war dabei ein so unangenehmes Zwitschern in den Ohren lokalisiert[4]), wie es bei derselben Zahl der Schwebungen und beliebiger Stärke in den tieferen Regionen nicht zustande kommt. Daß die nämliche Anzahl Stöße um so rauher klingt, je höher die Lage des Tonpaares ist, hat übrigens schon Helmholtz hervorgehoben. Er macht darauf aufmerksam, daß der Halbton $h^1 c^2$, die Ganztöne $c^1 d^1$ und $d^1 e^1$, die kleine Terz eg, die große Terz ce, die Quarte Gc und die Quinte CG je 33 Schwebungen geben, daß aber diese Intervalle mit zunehmender Tiefe immer mehr und mehr von Rauhigkeit frei werden.

Die obere Frequenzgrenze für die Wahrnehmbarkeit der Schwebungen ist in den einzelnen Oktaven verschieden, und zwar kann man um so raschere Schwebungen hören, je höher die Primärtöne sind. Stumpf[5]) vermochte in der großen Oktave, wenn C als tieferer Ton genommen wurde, mit ans Ohr gehaltenen Gabeln direkte Schwebungen noch bis über die Quinte hinaus zu vernehmen. Hier liegt also die Grenze bei etwa 40

[1]) Ann. der Physik (4), **11**, 43, 1903. — [2]) Tonempfindungen (5), S. 280 ff. — [3]) Tonpsychologie **2**, 452, 1890. — [4]) Sehr starke Schwebungen erregen infolge der heftigen Bewegung des Trommelfelles geradezu Tastempfindungen im Ohre. — [5]) Tonpsychologie **2** (1890).

Stößen in der Sekunde. Ich selbst habe gelegentlich in dieser Beziehung die kleine und die eingestrichene Oktave einer von Ton zu Ton fortschreitenden Prüfung unterworfen, wobei ich Edelmannsche Gabeln benutzte. Ich fand in der ersteren durchschnittlich etwa 60, in der letzteren 100 bis 130 Schwebungen noch eben als Rauhigkeit merklich. Die Terzen $c^3\,e^3$ und $e^3\,g^3$, die beide 264 Schwebungen geben, sind noch deutlich rauh und ebenso nach der Angabe von Stumpf die Intervalle $f^4\,g^4$, $g^4\,a^4$, $e^5\,f^5$ mit 341 sowie $a^4\,h^4$ mit 427 Schwebungen; $h^5\,c^6$ mit der Differenz 512 und $f^5\,g^5$ mit dem Schwingungszahlenunterschied 683 sind durchaus glatt. Je höher also die Tonregion, um so größer das Maximum hörbarer Stöße, um so kleiner aber andererseits das Intervall, welches eben noch rauh klingt: in der großen Oktave ist es ungefähr die übermäßige Quinte, in der eingestrichenen der Tritonus, in der dreigestrichenen die große Terz, in der viergestrichenen die große Sekunde und in der fünfgestrichenen die kleine Sekunde.

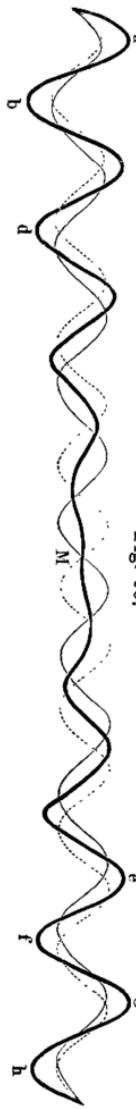


Fig. 95.

Haben zwei schwebende Primärtöne hinreichend kräftige Obertöne, so hört man auch deren Schwebungen. Das erste Obertonpaar gibt doppelt so viel Stöße wie die beiden Grundtöne, das zweite Obertonpaar dreimal so viel und so fort. Auch die Obertöne eines einzigen Grundtones können zusammen Schwebungen erzeugen, welche dann dem Klange eine größere oder geringere Rauhigkeit und Schärfe verleihen. Als Beispiel sei nur das C des Harmoniums erwähnt, bei dem die Teiltöne vom siebten (b^1) aufwärts einander genügend nahe liegen und stark genug sind, um merklich zu schweben.

Soviel von den Empfindungstatsachen. Betrachten wir nun noch kurz die physikalischen Verhältnisse und nehmen wir, um ein leicht übersichtliches Paradigma zu wählen, an, zwei Tone, von denen der eine 200, der andere 201 Schwingungen mache, begännen in gleicher Phase mit einer Verdichtung. Dann ist infolge der Addition dieser beiden Verdichtungen die Amplitude der Klangwelle im Anfang relativ beträchtlich. Nach einer halben Sekunde aber hat der tiefere Ton eben eine ganze, nämlich die hundertste, der hohere eine halbe Schwingung absolviert, und beide befinden sich in entgegengesetzten Phasen, so daß sie einander schwächen. Die Klangamplitude ist also nach einer halben Sekunde auf ein relatives Minimum gesunken, steigt dann indessen bis zum Ende der ganzen Sekunde, zu welcher Zeit beide Töne wieder gleiche Phasen bekommen, abermals zum Maximum an. Somit erfährt der Klang ein einmaliges Ab- und Anschwellen seiner Stärke in jeder Sekunde, es findet eine Schwebung pro Sekunde statt[1]). Die vorstehende Figur, die die Sinuswellen und die Klangwelle zweier Töne vom Schwingungszahlenverhältnis 8 : 9 darstellt, möge die Form einer

[1]) Diese Deduktion läßt zugleich erkennen, warum die Zahl der Schwebungen mit der Differenz der Schwingungszahlen der Primärtöne übereinstimmt.

„Schwebungskurve“ veranschaulichen. Die Buchstaben a bis h kennzeichnen das Maximum, M das Minimum der Schwebung.

Die Betrachtung einer solchen Kurve könnte einen mit der Physiologie des Hörens weniger Vertrauten auf die Vermutung bringen, die Wahrnehmung der Schwebungen käme in der Weise zustande, daß eben das Ansteigen der physikalischen Klangamplitude unmittelbar als Zunahme, das Absinken als Abnahme der Stärke empfunden würde. Allein so einfach liegt die Sache in Wirklichkeit nicht. Es darf nicht übersehen werden, daß beim Hören eine Auflösung des Klanges in seine Teiltöne stattfindet. Beobachtet man z. B. den schwebenden Zweiklang $gis^1 a^1$ oder $g^1 a^1$, so werden die Primärtöne nebeneinander getrennt vernommen. Wenn aber eine Klangzerlegung eintritt, wird man der lediglich bei und aus der Zusammensetzung resultierenden Gestalt der physikalischen Klangwelle einen Einfluß auf die Wahrnehmung absprechen müssen. Es wäre zu erwarten, daß die Primärtöne rein und glatt ohne Intensitätsschwankungen gehört würden. In der Tat verhält es sich auch speziell mit den Tönen gis^1 und a^1 und in analogen Fällen so, jedoch treten daneben Schwebungen auf, die als solche eines zwischen den Primärtönen gelegenen, von Stumpf[1]) als Zwischenton bezeichneten, Tones aufgefaßt werden, und bei anderen Zweiklängen erscheinen die Primärtöne selbst schwebend. Man wird daher zu der Annahme gedrängt, daß trotz der Zerlegung eine gegenseitige Beeinflussung der Primärtone im Sinne des Schwebens stattfindet. Die Lösung dieses Problems ist eine Aufgabe der Theorie des Hörens und wird im Abschnitte V d weiter erortert werden.

b) Die Kombinationstone.

Der Autor, welcher die Schwebungen zuerst erwähnt hat, dürfte Mersenne (1588 bis 1648) gewesen sein. Ungefähr 100 Jahre nach ihm wurde von dem Violinisten Tartini (1714) und dem deutschen Organisten Sorge[2]) eine andere sekundäre Klangerscheinung entdeckt, auf die wir heutigentags die Bezeichnung Differenztöne anwenden, weil es sich dabei um Töne handelt, deren Schwingungszahl gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Primärtone ist. Tartini und Sorge hörten zwar solche Töne, haben aber großtenteils irrtümliche Angaben über ihre Höhe gemacht. Die englischen Physiker Young und Gough stritten später darüber, ob der „tiefe harmonische Ton“ — so sagte man damals statt Differenzton, während in der neueren englischen Literatur die Benennung „Resultierender Ton“ viel gebraucht wird — mechanisch in der Luft entstehe, wie ersterer behauptete, oder ob er durch die Einbildungskraft der Seele erzeugt werde. Vieth[3]) hat diese Kontroverse summarisch dargestellt, aber erst Hällström[4]), der von Vieth den Ausdruck „Kombinationston“ übernahm, erkannte die Schwingungszahlenverhältnisse richtig. Der erste, der nach Hällström den Gegenstand wieder einer fundamentalen Bearbeitung unterzog, war Helmholtz[5]). Er fand (1856), daß zwei primäre Tone von den Schwingungs-

[1]) Tonpsychologie 2, 480 ff., 1890. — [2]) Vorgemach der musikalischen Komposition usw., Lobenstein 1745. — [3]) Gilberts Ann. 21 (1805). — [4]) De tonis combinationis; Diss., Aboae 1819 u. Pogg. Ann. 24, 438, 1832. — [5]) Lehre von den Tonempfindungen (5), S. 253 ff. (Daselbst auch weitere Literaturangaben.)

zahlen h und t (wobei $h > t$) unter passenden Umständen nicht nur einen Ton $h-t$, sondern auch einen Ton $h+t$ ergeben, und faßte diese beiden Klassen von sekundären Tonen, die er als Differenz- und Summationstöne unterschied, unter dem Namen Kombinationstöne zusammen. Seitdem haben die deutschen Akustiker diese Nomenklatur allgemein acceptiert.

Hällström hatte zunächst rein theoretisch den Satz abgeleitet, daß zwei Primärtöne h und t einen Kombinationston $h-t$ erzeugen. Die gleiche Überlegung führte ihn dann aber dazu, neben diesem ersten Tone einen zweiten von der Form $t-[h-t] = 2t-h$, einen dritten $h-[2t-h] = 2(h-t)$, einen vierten $[2t-h]-[h-t] = 3t-2h$ usw. zu postulieren. Behandelt man so jeden durch bloße Subtraktion gewonnenen Differenzton — die Summationstone wollen wir vorerst beiseite lassen — als neuen Primärton, der mit allen schon vorhandenen wieder Differenztöne hervorbringt, und berücksichtigt dabei, was von seiten Hällströms noch nicht geschah, auch die Obertöne der Primärtöne[1]), so ergibt sich eine endlose Menge von Differenztonen, wobei allerdings mehr oder weniger zahlreiche Koinzidenzen vorkommen. In Wirklichkeit werden nun immer nur einer oder einige von den durch die Rechnung zu erhaltenden Differenztönen wahrgenommen, wie auch schon Hällström ausdrücklich hervorhob. Wieviele ihrer aber in einem gegebenen Falle sind und welches Intensitätsverhältnis zwischen ihnen obwaltet, darüber läßt sich zurzeit noch keine endgültige Regel aufstellen. Was bisher an empirisch gefundenen Tatsachen bezüglich der Hörbarkeit und der sonstigen Eigenschaften der Differenztöne vorliegt, ist im wesentlichen das Folgende.

Die subjektive Deutlichkeit der Differenztöne und ihre Hörweite wächst im allgemeinen mit der Höhenlage der Primärtöne. Sind die letzteren selbst tief, so sind die noch tieferen Differenztöne oft recht schwer aus dem Klange herauszuhören. Koenigsche Gabeln mit Resonanzkasten, deren Tonhöhen der zweigestrichenen Oktave angehören, lassen, mit dem Bogen kräftig gestrichen, ihre Differenztöne bis auf 50 cm Abstand hören; in der dreigestrichenen Oktave wächst die Entfernung auf 7 bzw. 13 und 15 m. Den Differenzton 800 zweier leicht gegeneinander geschlagener Appunnscher Gabeln von 4000 und 4800 Schwingungen höre ich etwa 18 m weit. Auch die Differenztone der Galtonpfeifen sind sehr leicht und weit vernehmlich; Stumpf und Meyer haben solche noch bei Primärtönen aus der oberen Hälfte der sechsgestrichenen Oktave gehört. Es werden aber sogar Differenztöne wahrgenommen, wenn die Primärtöne jenseits der oberen Hörgrenze des Beobachters liegen, also an sich unhörbar sind. A. M. Mayer[2]) fand diese Tatsache bei Versuchen mit Lockpfeifen und Gabeln, und auch Koenig[3]) hat hierüber einige tatsächliche Angaben gemacht, die ihn selbst und mehrere andere zuverlässige Versuchspersonen betrafen und keinen Zweifel übrig lassen.

Erhöht oder vertieft man kontinuierlich den einen von zwei anfangs unisonen sehr hohen Tönen — ich[4]) habe derartige Versuche an Galtonpfeifen bis zu 12000 Schwingungen hinauf ausgeführt — so treten erst langsame,

[1]) Vgl. Ohm, Pogg. Ann. **47**, 465, 1839. — [2]) Report of the Meeting of the British Association for the Advancement of Science. Oxford 1894, p. 573. — [3]) Wiedemanns Ann. **69**, 636, 1899. — [4]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorg. **21**, 166 ff., 1899.

dann rascher und rascher werdende Schwebungen auf. Wenn ihre Zahl ungefähr 30 pro Sekunde beträgt, gesellt sich die erste Spur eines sehr tiefen, brummenden Differenztones hinzu, der dann mit wachsender Frequenz der Schwebungen klarer und höher wird. Verlegte ich das Primärtonpaar successive in immer tiefere Regionen der Skala, so fand bei einer ungefähr 30 Schwingungen betragenden Differenz der Tonhöhen stets eine Differenztonwahrnehmung statt, in der Regel schon viel früher. In den mittleren Oktaven kann man bereits bei 16, 14, auch 10 Schwebungen einen äußerst tiefen Differenzton hören; allerdings besteht hier die Möglichkeit, um nicht zu sagen Wahrscheinlichkeit, daß derselbe von Obertönen herstammt, die ja untereinander ebensogut Schwebungen und Differenztone erzeugen wie die Primärtöne, wenn auch meist entsprechend schwächere. Bei Primärtönen unterhalb der kleinen Oktave wird es mir schwierig, allertiefste Differenztöne aus dem Klange herauszuhören, während es bei den ganz hohen Oktaven sehr leicht ist.

Vergrößert man also, vom Unisono ausgehend, das Intervall der beiden Primärtone allmählich, so hört man, von den untersten Oktaven abgesehen, anfangs nur Schwebungen, dann während eines kürzeren oder längeren Spatiums Schwebungen und Differenzton zugleich und schließlich nur noch den letzteren allein. Dieser Ton $h—t$ ist in seiner größten Tiefe an sich rauh wie alle tiefsten Töne, aber auch mit zunehmender Höhe haftet ihm noch ein gewisser Mangel an Glätte an, vermutlich, weil man geneigt ist, die Rauhigkeit der Primärtonschwebungen als eine solche des Differenztones aufzufassen.

Liegen die Primärtöne hoch, so bewirken relativ kleine Intervalländerungen verhältnismäßig beträchtliche Höhenschwankungen des ersten Differenztones ($h—t$). Nehmen wir beispielsweise an, die Primärtöne hätten die Schwingungszahlen 1000 und 1032, so hören wir als Differenzton das Kontra-C. Erhöhen wir nun kontinuierlich die Differenz auf weitere 32 Schwingungen, so durchläuft der Differenzton eine ganze Oktave, und rund vier Oktaven, wenn wir das Primärtonintervall bis zur Quinte erweitern. Dabei verändert sich der Differenzton aber stetig, nicht, wie früher gelegentlich von verschiedenen Seiten behauptet ist, sprungweise. Analog verhält es sich mit dem zweiten Differenzton $2t—h$, welcher herabsteigt, wenn der erste aufsteigt — beide kreuzen sich in dem Augenblick, wo das Primärtonintervall die Quinte erreicht — und mit den Differenztonen noch höherer Ordnung.

Große Stärke der Primärtöne ist für die Wahrnehmung der Differenztone zwar nützlich, aber lange nicht so wichtig, wie Helmholtz ursprünglich glaubte. Man kann dieselben unter Umständen auch mit verstopften Ohren oder bei sonst irgendwie erzeugter Schwächung der Primärtöne wohl vernehmen. Stumpf teilt sogar in der Tonpsychologie mit, er habe zu Zeiten, wo er viel darauf achtete, Differenztöne an der Violine, am Klavier und bei gedackten Pfeifen hundertfach selbst dann gehört, und zwar gerade besonders deutlich, wenn die Tongebung die schwächste war, die sich überhaupt herstellen ließ. Dahingegen gibt es in allen Fällen ein Optimum des Stärkenverhältnisses der Primärtone, welches oft, aber nicht notwendig mit der Gleichheit der Intensitäten zusammenfällt. So pflegt der zweite Differenzton hervorzutreten, wenn der tiefere Primärton überwiegt, offenbar weil dessen Oktave $2t$ dadurch stark genug zur Bildung des Tones $2t—h$ wird. Ferner

finde ich, daß das Intervall, und bei gleichem Intervall die Höhenlage der Primärtöne von Bedeutung ist.

Bevorzugt scheinen hinsichtlich ihrer Stärke die Differenztöne von der Schwingungszahl n, welche gehört werden, wenn die Schwingungszahlen der Primärtöne im Verhältnis $mn:(m+1)n$ stehen. Töne vom Verhältnis $3n:5n$ ergeben $2n$ in tiefer Lage wenig deutlich, in höherer Lage besser. Beim Intervall 4:7 höre ich, wenn Gabeln und Flaschentöne benutzt werden, den ersten Differenzton 3 so gut wie gar nicht, wohl aber den zweiten $2.4—7 = 1$. Auch bei der kleinen Sexte (5:8) ist der Differenzton 2 ($= 2t—h$) gewöhnlich stärker als 3 ($= h—t$). Der erste Differenzton 4 des Verhältnisses 5:9 ist ebenfalls durchweg bedeutend schwächer als 1. Ähnlich steht es mit 7:12 und überhaupt mit solchen Intervallen, die zwischen Quinte und Oktave und näher der letzteren liegen. Versuche hierüber stellt man am besten in der Weise an, daß man zwei möglichst obertonfreie Töne anfänglich unison stimmt und dann mit dem einen die Tonleiter hinauf geht. Es zeigt sich dabei [1]), daß der erste Differenzton bis über die Quinte hinaus gut und laut zu hören ist, weiterhin aber schwächer wird und bei der großen Septime erlischt. Er taucht auch bei fortgesetzter Vergrößerung des Intervalls über die Oktave hinaus, wobei er der Rechnung nach zwischen die Primärtöne fällt, nicht wieder auf. Sog. zwischenliegende Differenztone sind also, sofern sie nicht etwa durch gleich hohe, von Obertönen herstammende Differenztöne höherer Ordnung vorgetäuscht werden, nicht hörbar, wenigstens nicht bei der gewöhnlichen Art der Beobachtung. Unter Anwendung besonderer Versuchsbedingungen sind sie nach Krueger [2]) allerdings zu vernehmen, aber jedenfalls „erheblich leiser und undeutlicher als Differenztöne derselben Ordnung bei Klängen innerhalb der Oktave".

Max Meyer [3]), der sich viel mit Differenztönen beschäftigt hat, untersuchte Klänge von Stimmgabeln auf Resonanzkasten. Es wurden beim Intervall 4:5 die Differenztone 1, 3 und gelegentlich 6 gehört. 5:6 ergab 1, 3, 4, (7). 4:7 ließ die Töne 6, 5, 3, 1 und 6:7 die Töne 5, 4, 1 hören. Bei 7:8 wurden 6, 5, (4), 1 und bei 8:9 außer 1 noch 7, 6, 5 vernommen. Bei 9:10 war 7, 6 und 1 stark, 8 zuweilen deutlich. Das Verhältnis 16:17 ergab außer 1 nur 10 und 12, der Dreiklang 5:6:16 lediglich, aber sehr stark 1. Dagegen wurden beim Molldreiklang 10:12:15 neben den Primärtönen die den Zahlen 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, (9) entsprechenden Kombinationstöne gehört. Meyer betont zwar, daß Obertöne der Gabeln mit bloßem Ohre nicht hörbar gewesen seien; dennoch glaube ich, daß seine Ergebnisse, die übrigens zum Teil mit der Stärke der Primärtöne variierten und die ich nicht durchweg bestätigen kann, der Hauptsache nach auf die Mitwirkung von Obertönen zurückzuführen sind. Wenn Meyer zu dem Schlusse kommt, man könne nur durch das Experiment ermitteln, welche Differenztöne einen gegebenen Zweiklang begleiten, und dürfe sich nie auf irgend eine Regel verlassen, so möchte ich für meine Person hierin ihm beistimmen. Krueger

---

[1]) Vgl. meine Abhandlungen in Pflügers Arch. **78**, 517 ff. und **83**, 76, 1900. — [2]) Wundts Philos. Stud. **17**, 208 ff., 1901. — [3]) Über Kombinationstöne usw. Berliner Diss. 1896; auch Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **11**, 177 und ebenda **16**, 1, 1898.

dagegen hat in der eben erwähnten Abhandlung auf Grund seiner systematischen Beobachtungen über Zweiklänge als im allgemeinen gültig den Satz aufgestellt, daß zwei annähernd gleich starke Primärtöne von mittlerer Lage einen Summationston nebst vier bis fünf Differenztönen erzeugen und daß diese Kombinationstöne nicht an das Dasein von Obertönen gebunden sind; die Tonhöhen der Differenztöne seien dabei derart zu berechnen, daß man zunächst die Schwingungszahlen der Primärtöne und dann fortgesetzt die beiden kleinsten Schwingungszahlen voneinander subtrahiere.

Wie man sieht, sind die Ansichten über die Zahl und die Stärke der Kombinationstöne, welche irgend ein bestimmtes Intervall erwarten bzw. hören läßt, recht different, was offenbar in der Verschiedenheit der jeweiligen objektiven und subjektiven Beobachtungsbedingungen seine Ursache hat. Um so weniger Zweifel herrscht dafür bezüglich eines anderen, hier noch zu erwähnenden, weil theoretisch wichtigen, Punktes; ich meine die Tatsache, daß die Kombinationstöne sich in Zusammenklängen ganz wie primäre Töne verhalten. Ein Differenzton, der einem anderen Differenzton oder einem primären der Höhe nach hinreichend nahe kommt, schwebt mit demselben, und bei geeigneter Höhendistanz verschmelzen, wie wenigstens Krueger[1]) behauptet, zwei Differenztöne (oder ein Differenzton und ein Primärton) zu einem Zwischenton, gerade wie zwei Primärtöne es unter den gleichen Umständen tun würden. Krueger weist zugleich darauf hin, daß die mit der Verschmelzung zweier Differenztöne zu einem Zwischenton verbundene Höhenänderung als Erklärung dienen könne für die von einzelnen Autoren gemachte merkwürdige Angabe, sie hörten Differenztöne zuweilen bis um einen halben Ton zu hoch. Ein dem Musiker bekanntes Beispiel für Differenztonschwebungen sind die Stöße der Töne h—t und $2\,t$—h, welche auftreten, wenn h und t eine verstimmte Quinte bilden. Bei genügend großem und sonst passendem Intervall erzeugen zwei Kombinationstöne oder ein Kombinations- und ein primärer Ton auch einen neuen Kombinationston.

Die Summationstöne sind bei weitem weniger leicht zu vernehmen als die Differenztöne. Helmholtz hörte sie bei Benutzung von Stimmgabeln mit Resonanzröhren nur mit großer Mühe. Besser gelang es ihm mit Orgelpfeifen, zumal wenn das Ohr den Mundöffnungen derselben genähert wurde. Sehr deutlich waren sie am Harmonium, und als ganz besonders geeignet zu ihrer Erzeugung erwies sich die Helmholtzsche Doppelsirene[2]), die sogar Summationstone zweiter Ordnung hören ließ. Von den späteren Forschern haben manche überhaupt niemals Summationstöne bemerken können, wovon verschiedene in der Literatur sich vorfindende Mitteilungen Zeugnis ablegen. Am deutlichsten spricht sich in diesem Sinne Hermann[3]) aus, indem er sagt, die Summationstöne würden von vielen auch unter den günstigen Bedingungen, welche die Doppelsirene darbiete, nicht wahrgenommen, und speziell ihm selbst sei es nie geglückt, sie zu hören oder jemand zu finden, der es vermocht hätte. Andere Autoren haben betont, daß die Summationstöne nur durch Instrumente mit scharfer Klangfarbe, also mit

[1]) Vgl. Wundts Philos. Stud. **17**, 187 und 207. — [2]) Über Bau und Verwendung derselben vgl. Lehre v. d. Tonempf. (5), S. 269 f. und Beilage 13. — [3]) Pflügers Arch. **49**, 500, 1891.

vielen Obertönen, und nicht in hohen Lagen hervorgebracht würden. So G. Appunn, den Preyer[1]) zitiert. Preyer selbst stimmt ihm zu, abgesehen von einem Ausnahmefall, der darin bestand, daß auch Gabeln mit Kautschukringen, welche die harmonischen Obertöne abdämpfen sollten, bei starkem Tönen Summationstöne ergaben; aber diese Ausnahme ist insofern zweifelhaft, als, wie man jetzt weiß, die Kautschukringe den erwähnten Effekt nur in sehr beschränktem Maße haben. Stumpf[2]) konnte ebenfalls die Summationstöne, die er am Harmonium, an der Sirene und an Zungenpfeifen, nicht aber bei Flötenpfeifen beobachtete, von den Obertönen herleiten und sie somit für Differenztöne hoherer Ordnung erklären.

Daß dies rechnungsmäßig angängig ist, darauf haben schon Röber (1856), R. Fabri (1860), G. Appunn[3]) u. a. aufmerksam gemacht mit dem Hinweis, daß $2h - (h - t) = h + t$ sei. Auch R. Koenig[4]) ist dafür eingetreten, daß die Summationstöne im allgemeinen von Obertönen herrührten, verfuhr aber ungenau hinsichtlich der Bestimmung der betreffenden Obertöne. Da ein jüngerer Autor ihm hierin gefolgt ist, dürfte es nützlich sein, an dieser Stelle einige Formeln zur Ableitung der Summationstöne mitzuteilen, nämlich:

(1) . . . $h + t = h + t + ah - ah$ oder $h + t = ah - [(a - 1)h - t]$
(2) . . . $h + t = h + t + at - at$ oder $h + t = at - [(a - 1)t - h]$
(3) . . . $h + t = h + t + ah - ah + at - at$ oder $h + t$
$= [ah - (a - 1)t] - [(a - 1)h - at]$
(4) . . . $h + t = h + t + ah - ah + bt - bt$ oder $h + t$
$= [ah - bt] - [(a - 1)h - (b + 1)t]$
(5) $ah = bt$; $h + t = h + t + ah - bt$ oder $h + t = (a + 1)h - (b - 1)t$
(6) $ah = bt$; $h + t = h + t + bt - ah$ oder $h + t$
$= (b + 1)t - (a - 1)h$

Diese Formeln, die übrigens zum Teil auf zwischenliegende Differenztöne führen, sind nur anwendbar, sofern die vorkommenden Differenzen positiv sind. Außerdem müssen a und b selbstverständlich ganze Zahlen sein.

Eine Entscheidung darüber, ob wirklich zwei Primärtöne ohne Mitwirkung von Obertönen einen Summationston hervorzubringen vermögen, wäre etwa in der Weise zu versuchen, daß man von sämtlichen Tonpaaren, welche rechnungsmäßig einen Summationston als Differenzton höherer Ordnung ergeben würden, je einen Ton durch Interferenz beseitigte. Krueger[5]) berichtet über einige hierauf bezügliche Experimente. Allein dieselben sind alle deswegen unzureichend, weil dabei immer nur ein einzelner Oberton berücksichtigt worden ist. Bis auf weiteres wird man daher mit der übrigens keineswegs unwahrscheinlichen Möglichkeit zu rechnen haben, daß es sowohl echte wie unechte Summationstöne gibt.

Wenn man eine aus zwei Grundtönen h und t nebst diversen Obertönen durch einfache Superposition zusammengesetzte Klangwelle nach Fourier

---

[1]) Wiedemanns Ann. **38**, 131, 1889. — [2]) Tonpsychol. **2**, 255, 1890. — [3]) Ant. Appunn hat später der Auffassung seines Vaters G. Appunn, daß die Summationstöne Differenztöne höherer Ordnung seien, in einer übrigens nicht ganz einwandfreien Untersuchung (Wiedemanns Ann. **42**, 338 bis 343, 1891) direkt widersprochen. — [4]) Pogg. Ann. **157**, 217 ff., 1876. Expériences d'acoustique, Paris 1882, p. 124 ff. — [5]) Wundts Phil. Stud. **17**, 278 ff., 1901.

zerlegt, so erhält man weder einen Differenz- noch einen Summationston. Da das Ohr ebenso analysiert und doch Kombinationstöne hört, so müssen für diese besondere, gleichsam eine Tonquelle für sich bildende Existenzbedingungen vorhanden sein. Bei der Helmholtzschen Doppelsirene, dem Harmonium, den Appunnschen Zungenkasten und — wie ich kürzlich in einer noch unveröffentlichten Untersuchung fand — auch bei laut tönenden Telephon- sowie gewissen anderen Membranen bestehen dieselben in physikalischen Verhältnissen. Denn die Kombinationstöne der genannten Instrumente bringen gleichgestimmte Resonatoren zum Mitschwingen. Für Harmonium und Doppelsirene hat Helmholtz[1]) dies zuerst gezeigt und folgendermaßen erklärt. Das Wesentliche ist, daß beide Primärtöne durch Anblasen aus einem gemeinsamen Windraume erzeugt werden. Die in demselben enthaltene Preßluft wird durch die Töne stark erschüttert und durch jede Öffnung Luft geblasen, die schon durch den anderen Ton in schwingende Bewegung versetzt ist, also nicht mit gleichmäßiger, sondern mit periodisch zu- und abnehmender Stärke austritt. Wenn aber die Amplitude einer Tonbewegung in solcher Weise schwankt, so geht der einfache Ausdruck für die Bewegung mit konstanter Amplitude:

$$q = B\ [1 - \sin 2\pi n t]$$

über in:

$$q = B_1\ [1 - \sin 2\pi m t]\ [1 - \sin 2\pi n t]$$

$$= B_1\ [1 - \sin 2\pi m t - \sin 2\pi n t + \frac{1}{2}\cos 2\pi (m - n) t - \frac{1}{2}\cos 2\pi (m + n) t]$$

und es werden somit außer den primären Tönen m und n auch die Kombinationstöne $m + n$ und $m - n$ gehört werden; genauer genommen entstehen sogar noch mehr Töne, da der Vorgang in Wirklichkeit viel komplizierter ist, als die vorstehende Gleichung zum Ausdruck bringt. (Dieselbe entspricht überdies auch insofern nicht ganz den Tatsachen, als nach ihr auch zwischenliegende Differenztöne hörbar und die Summationstöne ebenso laut sein müßten wie die Differenztöne.)

Doppelsirene, Harmonium, Zungenkasten und die erwähnten Membranen sind nun aber bis jetzt die einzigen Instrumente, welche außerhalb des Ohres nachweisbare, also objektive, Kombinationstöne geben. Die Differenz- und Summationstöne anderer Tonquellen sind als ausschließlich im Ohre entstehende, also subjektive, Töne anzusehen, da es verschiedenen Forschern[2]) trotz Anwendung feiner Reaktionsmethoden nicht gelungen ist, ihre Existenz in der Luft zu konstatieren.

---

[1]) Lehre v. d. Tonempfindungen (5), S. 259 f. u. Beilage 16. Weitere Abhandlungen über den physikalischen Nachweis der Kombinationstöne sind: O. Lummer, Verhandl. d. Berl. physik. Gesellsch. 1866 (7. Juli), S. 66. Rücker u. Edser, Philos. Magaz. **39**, 341 bis 357, 1895. (Diese Autoren sind auch für die Existenz echter, nicht als Differenztöne zu betrachtender objektiver Summationstöne eingetreten.) Forsyth and Sowter, Proceedings of the Roy. Soc. of London **63**, 396, 1898. K. L. Schaefer, Pflügers Arch. **78**, 519, 1900. — [2]) R. Koenig, Pogg. Ann. **157**, 221, 1876; W. Preyer, Akustische Untersuchungen, Jena 1879, S. 13 ff.; M. Wien, Wiedemanns Ann. **36**, 853, 1889; Hermann, Pflügers Arch. **49**, 516, 1891; Rücker u. Edser, Philos. Mag. **39** (1895); Forsyth and Sowter, Proc. Roy. Soc. London **63** (1898); Krueger, Wundts Philos. Stud. **17**, 218, 1901.

Besitzen wir somit im Ohre einen Mechanismus, durch welchen Kombinationstöne den von außen kommenden Primärtönen gewissermaßen hinzugefügt werden, so ist zu erwarten, daß beim Angeben eines Primärtonpaares auf dem Harmonium oder etwa der Doppelsirene neben den objektiven Differenz- und Summationstönen auch subjektive gehort werden. Das ist denn auch in der Tat der Fall und es ist besonders bemerkenswert, daß die objektiven Töne dabei dieselben sind wie die subjektiven. An und für sich wäre es ja möglich, vielleicht gar wahrscheinlicher, daß der physikalische Prozeß im Harmonium Kombinationstöne von anderer Zahl und Höhe hervorriefe als die entsprechende physiologische Einrichtung. Indessen trifft dies, wie gesagt, nicht zu, wenigstens nicht nach den bisherigen, freilich noch keineswegs erschöpfenden, Erfahrungen. Soviel wir wissen, wird jeder gehörte Kombinationston des Harmoniums (und der anderen analog funktionierenden Apparate), falls er nicht überhaupt zu schwach ist, um einen Resonator zu erregen, auch durch einen solchen verstärkt, und wenn man während der Beobachtung des Kombinationstones im Resonator den Versuch derart modifiziert, daß jeder der beiden Primärtöne von einem gesonderten Windraum aus angeblasen wird [1]), so verstummt der Resonator alsbald, der betreffende Kombinationston klingt aber, nunmehr subjektiv und übrigens nur wenig geschwächt, weiter. Speziell in der früher erwähnten Beziehung, daß der erste Differenzton zweier Primärtöne, wenn deren Höhendistanz sich der großen Septime nähert, sehr schwach wird und bei weiterer Vergrößerung des Intervalls unter den gewöhnlichen Bedingungen für das Ohr verschwindet, fand ich [2]) eine so gut wie vollkommene Übereinstimmung zwischen den objektiven und den subjektiven Differenztönen. Dieses Verhalten spricht von den vorneherein dafür, daß die entotischen Kombinationstöne auf ähnliche Weise physikalisch zu Stande kommen wie die objektiven außerhalb des Ohres. Auf ihre Entstehung wird im Abschnitte V zurückzukommen sein.

c) Die Variations- und sog. Unterbrechungstöne.

Schon im Jahre 1844 ist von Seebeck in seiner Abhandlung über die Definition des Tones [3]) eine Überlegung darüber angestellt worden, was geschieht, wenn die Amplitude eines einfachen Tones von der Schwingungszahl n nicht konstant bleibt bzw. in gleichmäßigem Abklingen sinkt, sondern m mal pro Sekunde pendelperiodisch auf und ab schwankt. Er kam zu dem Ergebnis, daß dann neben dem Tone n noch die Töne $n + m$ und $n - m$ auftreten müßten, verfolgte aber den Gegenstand nicht experimentell. Dies hat erst Helmholtz [4]) getan, der darüber Nachstehendes mitteilt: „Der untere Kasten meiner Doppelsirene klingt stark mit, wenn die Gabel a^1 vor seine untere Öffnung gehalten wird und die Löcher alle gedeckt sind, nicht aber, wenn die Löcher einer Reihe offen sind. Läßt man nun die Sirenenscheibe rotieren, so daß die Löcher abwechselnd offen und gedeckt sind, so erhält man eine Resonanz der Stimmgabel von periodisch wechselnder Stärke.

---

[1]) Vgl. Lehre v. d. Tonempf. (5), S. 261 u. meine Abhandlung in Pflügers Arch. 83, 74. — [2]) Pflügers Arch. 78, 521 u. 83, 76, 1900. — [3]) Pogg. Ann. 63, 365 f. — [4]) Lehre von den Tonempfindungen (1), S. 597, 1863.

Ist n die Schwingungszahl der Gabel, m die Zahl, welche angibt, wie oft ein einzelnes Loch des Kastens geöffnet wird, so ist die Stärke der Resonanz eine periodische Funktion der Zeit, also im einfachsten Falle zu setzen gleich

$$1 - \sin 2\pi m t.$$

Die Schwingungsbewegung der Luft erhält also dann die Form[1])

$$(1 - \sin 2\pi m t) \sin 2\pi n t = \sin 2\pi n t + \frac{1}{2} \cos 2\pi (m + n) t$$

$$- \frac{1}{2} \cos 2\pi (n. - m) t$$

und man hört deshalb außer dem Tone n auch noch die Töne $m + n$ und $n - m$. Dreht sich die Sirenenscheibe langsam, so ist m sehr klein, und die genannten Töne sind einander sehr nahe, so daß sie Schwebungen geben. Bei rascher Drehung dagegen trennt sie das Ohr."

Solche Töne von der Form $n + m$ und $n - m$ pflegt man gegenwärtig als Variationstöne zu bezeichnen. Dieser Ausdruck stammt von Radau[2]), welcher in ähnlicher Weise wie Seebeck und Helmholtz berechnete, daß der Ton einer rotierenden Klangplatte sich unter gewissen Bedingungen in einen hoheren und einen tieferen spalten müsse. Stefan[3]) bestätigte Radaus rein theoretische Deduktion durch Versuche folgender Art. Dreht man eine tönende Scheibe vor dem Ohre, so daß nacheinander ihre vier Abteilungen demselben gegenüber zu stehen kommen, so hört man den Ton bei jeder Umdrehung viermal anschwellen und verlöschen. Bei langsamer Drehung schwebt der Ton, bei schnellerer tritt allmählich die Spaltung ein. Dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn man eine Stimmgabel in eine Zentrifugalmaschine oder Drehbank einspannt, anstreicht und vor dem Ohre rotieren läßt. Desgleichen kann auch eine Glocke zu diesem Zwecke benutzt werden. Die bequemste Methode zur Erzielung von Variationstönen ist aber ein ziemlich gleichzeitig von Mach und Stefan[3]) gefundenes und benutztes Verfahren, welches darin besteht, daß man vor einer klingenden Gabel eine Scheibe mit kreisförmig angeordneten, gleich großen und gleich weit voneinander abstehenden Löchern rotieren läßt. Jedesmal, wenn eine der Öffnungen die Gabel passiert, wird der Ton wie durch einen Resonator verstärkt; man erhalt also in der Sekunde so viel Tonstoße, wie Löcher an der Gabel vorüberkommen, und kann die Anzahl derselben durch Wechsel der Umdrehungsgeschwindigkeit leicht beliebig variieren.

Wenn die eben erwähnte mathematische Ableitung der Variationstöne richtig ist, woran kaum zu zweifeln sein dürfte, so sind dieselben physikalisch bedingte, objektive Töne. In der Tat bringen sie denn auch Resonatoren zum Mittönen, wie schon von Stefan und Beetz in vereinzelten Fällen und neuerdings in größerem Umfange von mir und Abraham[4]) gezeigt worden ist. Unter diesen Umstanden haben die Variationstöne an sich keine besondere theoretische Bedeutung für die Physiologie des Hörens; wohl aber gilt dies von gewissen Tönen, welche die Variationstöne unter geeigneten Be-

[1]) Im Original steht irrtümlicherweise am Schlusse der Formel: $(m + n)t$. — [2]) Moniteur scientifique 1865, p. 430 und 1866, p. 792. — [3]) Sitzungsber. d. k. k. Akad. d. Wissensch. z. Wien., mathem.-naturw. Kl., **53** (2), 696 und **54** (2), 598, 1866. — [4]) Pflügers Arch. **88**, 482, 1901.

dingungen begleiten, und denen nach unserer oben gewählten Bezeichnung die Schwingungszahl m zukommt.

Woher kommen diese Tone? Am nächsten liegt es meines Erachtens, sie als Kombinationstöne anzusehen. Sowohl der höhere Variationston und der primare Ton als auch der Primärton und der tiefere Variationston ergeben m als Differenz ihrer Schwingungszahlen, und der Höhenunterschied der beiden Variationstöne ist gleich $2m$. Wenn daher ein Primärton mit seinen Variationstönen zusammen erklingt, so wird man, der Differenztonbildung günstige Verhältnisse selbstverständlich vorausgesetzt, geradezu mit Bestimmtheit erwarten müssen, daß der zweifach bedingte und eventuell durch seine Oktave $2m$ verstärkte Differenzton m hörbar sei. Demgemäß hat auch A. M. Mayer[1]), als er den intermittierenden Klang einer c^2-Gabel beobachtete und dabei außer dem Primärtone c^2 und den Variationstönen e^2 und g^1 noch ein c^0 hörte, diesen letzteren Ton (den er übrigens in der beigefügten Notenübersicht falsch angibt) als Differenzton der Variationstöne und des Gabeltones aufgefaßt.

Dagegen haben viele andere Akustiker und Psychophysiker, namentlich R. Koenig, diese sozusagen natürlichste Erklärungsmöglichkeit übersehend oder ignorierend, Gewicht darauf gelegt, daß m gleich der Anzahl der Stöße pro Sekunde ist, in welche der Primärton durch die Versuchsanordnung zerlegt wird, und den Ton m dahin interpretiert, daß er ein Unterbrechungston sei. Diese Autoren sind nämlich der Ansicht[2]), daß das Ohr einen Ton von der Schwingungszahl x nicht nur dann vernimmt, wenn es von x Pendelschwingungen pro Sekunde getroffen wird, sondern auch, wenn ein anderer Ton von der Schwingungszahl y durch x innerhalb der Sekunde in gleichen Zeitabständen aufeinanderfolgende Pausen oder Intensitätsremissionen unterbrochen wird, und bezeichnen einen solchen Ton x eben als Unterbrechungston.

Koenig[2]) konstatierte, als er nacheinander verschieden hohe Gabeln vor eine rotierende Löcherscheibe hielt, daß der „Intermittenzton" bei den tieferen Gabeln schwach war und neben den Variationstönen sehr zurücktrat, bei den höchsten und sehr starken Gabeln (c^4 und c^5) aber eine große Intensität hatte, während hier die Variationstöne kaum oder gar nicht hörbar waren. Abraham und ich[3]) konnten die Richtigkeit dieser Beobachtung bestätigen. Dieselbe widerspricht auf den ersten Blick scheinbar, aber auch nur scheinbar, der Auffassung des Tones m als eines Kombinationstones. Tiefe Gabeln geben entsprechend tiefe Variationstöne, und die Differenztöne tiefer Töne sind, wie schon hervorgehoben wurde, viel schwächer als solche hoher Primärtöne. Wenn also m bei der Anwendung tieferer Gabeln nur leise neben den relativ lauten Variationstönen gehört wird, so ist das gewiß kein Beweis gegen seine

[1]) Americ. Journ. of Science and Arts **9**, April 1875. — [2]) Die wichtigsten Arbeiten, in welchen dieselbe vertreten worden ist, sind: R. Koenig, Pogg. Ann. **157**, 177 ff., 1876 und Quelques expériences d'acoustique **9**, Paris 1882. Dennert, Arch. f. Ohrenheilk. **24**, 171 ff. L. Hermann, Pflügers Arch. **56**, 485 ff., 1894. (Siehe auch Hermanns verschiedene Abhandlungen zur Vokalfrage in Pflügers Arch.) W. Wundt, Philos. Stud. **8**, 641 ff., 1893. [Neuerdings hat aber Wundt diesen Standpunkt zugunsten der von mir und Abraham gegebenen Erklärung der Unterbrechungstöne verlassen. (Grundzüge der Physiolog. Psychol. (5), **2**, 1902.)] Ebbinghaus, Grundzüge der Psychol. **1**, 312, 1902. — [3]) Pflügers Arch. **88**, 475, 1901.

Differenztonnatur. Wenn andererseits die Gabeln c^4 und c^5 bei mäßiger Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe keine Variationstöne hören lassen, so kommt dies einfach daher, daß die Variationstöne dem Gabelton zu nahe liegen, um durch das Ohr analytisch von ihm getrennt zu werden. Vorhanden sind sie darum doch, und dann liegt kein Grund vor, den hier kräftigen Ton m nicht als ihren Differenzton zu betrachten. Machen doch auch zwei zugleich klingende Gabeln von den Schwingungszahlen 3200 und 3840 oder ähnliche Tonpaare durchaus den Eindruck eines einzigen Tones, während man daneben sehr laut den Differenzton hört. Wäre m tatsächlich ein „Intermittenzton", wirkte also mit anderen Worten jeder der m Tonstöße, in welche der Ton n durch die periodischen Intensitätsschwankungen verwandelt wird, wie eine einzelne, das Ohr treffende Luftverdichtung, so sollte man erwarten, daß diejenigen Gabeln, welche die lautesten Tonstöße geben, auch die stärksten „Unterbrechungstöne" produzierten. In Wirklichkeit ist indessen eher das Gegenteil der Fall. Gerade die tieferen Gabeln erfahren durch die vorüberpassierenden Löcher der rotierenden Scheibe die kräftigste Resonanz, und gerade sie liefern die schwächsten „Intermittenztöne". Demnach dürfte die Ansicht, daß die hier in Rede stehenden sog. Unterbrechungstöne faktisch nichts anderes als Differenztöne sind, wohl das Richtige treffen.

Nun existieren aber in der akustischen Literatur noch andere Arten von „Unterbrechungstönen".

Wird nach Koenig der Löcherkreis einer Seebeckschen Sirene so eingerichtet, daß die Öffnungen nicht wie üblich gleichen Durchmesser haben, sondern periodisch an Größe zu- und wieder abnehmen, so gelangt ein Ton von periodisch wechselnder Stärke ins Ohr des Beobachters, wenn man den Kreis mit einer Röhre von der Weite der größten Löcher anbläst. Dieser Ton ist der Hauptton, dessen Höhe bekanntlich der Anzahl der pro Sekunde angeblasenen Öffnungen entspricht. Neben ihm hört man aber noch einen Ton, dessen Schwingungszahl der Zahl der Intensitätsmaxima gleichkommt und der von Koenig und seinen Anhängern wiederum als ein „Unterbrechungston" aufgefaßt worden ist, welcher nur dadurch erklärbar sei, daß das Ohr eben jede Art von Periodik als Ton perzipiere. Demgegenüber habe ich[1]) in Gemeinschaft mit O. Abraham gezeigt, daß die „Unterbrechungstöne" dieser Form Resonatoren zum Mitschwingen bringen. Sie sind also physikalischen Ursprungs, und es ist nichts unmotivierter, als ihretwegen dem Ohre die Fahigkeit der Wahrnehmung von Tonen zuzuschreiben, denen keine pendelformigen Schwingungen zugrunde liegen. Zu dem gleichen Resultate führten unsere Versuche[2]) mit solchen „Unterbrechungstönen", welche entstehen, wenn man eine Sirenenscheibe anblast, deren Löcherkreis aus alternierenden gleich großen Gruppen von offenen und verstopften Löchern besteht, oder wenn man auf einem rotierenden Zahnrade, an welchem in gleichen Abständen einzelne Zahne fehlen, ein Kartenblatt schleifen läßt. Bei dieser Untersuchung ergab sich ferner, daß die von Hermann[3]) beobachteten Phasenwechseltöne ebenfalls objektive Töne sind und mit den zuletzt erwähnten „Unterbrechungstonen" auf einer Stufe stehen.

---

[1]) Pflügers Arch. **83**, 209, 1901. — [2]) Ebenda **83**, 207 u. **85**, 536 ff., 1901. — [3]) Ebenda **56**, 489 ff., 1894.

Auch auf elektro-akustischem Wege hat man versucht, Tonunterbrechungen zu erzielen; so Zwaardemaker in seiner Arbeit über Intermittenztöne [1]). Derselbe verband ein Blakesches Mikrophon mit einem oder zwei Leclanché-Elementen und der primären Spirale einer kleinen Induktionsspule zu einem Stromkreise, während die sekundäre Spirale zu einem Telephon führte. Diese sekundäre Kette konnte durch eine elektrisch getriebene Stimmgabel 64 mal in der Sekunde geöffnet und geschlossen werden. War sie dauernd geschlossen, während durch das Mikrophon ein Ton auf das Telephon übertragen wurde, so hörte man nur diesen Hauptton. Funktionierte aber während seiner Beobachtung die Unterbrechungsvorrichtung, so vernahm man „ungemein schön einen kräftigen Unterbrechungston" von 64 Schwingungen. War die Unterbrechungsvorrichtung im Gange, ohne daß das Mikrophon erregt wurde, so war von dem Tone 64 so gut wie nichts zu hören. Zwaardemaker ist nicht zu voller Klarheit darüber gelangt, ob sein „Intermittenzton" physikalisch oder physiologisch bedingt war. Abraham und ich [2]) haben seine Versuche in größerem Umfange und teilweise in etwas veränderter Form wieder aufgenommen, wobei vor allem dafür gesorgt ward, daß die Schwingungszahlen der Haupttöne und die Frequenz der Unterbrechungen in möglichst weiten Grenzen variiert werden konnten. Es ergab sich, daß die Angaben Zwaardemakers ungenau sind und die Verhältnisse in Wirklichkeit folgendermaßen liegen. Der Hauptton wird durch die Intermittenzen im allgemeinen geschwächt oder ganz zum Verschwinden gebracht und an seiner Stelle ein mehr oder weniger komplizierter Klang im Telephon gehört. Dieser Klang enthält einen oder zwei charakteristische Teiltöne, deren Schwingungszahlen in gesetzmäßiger Weise von der Höhe des Haupttones und der Anzahl der Unterbrechungen pro Sekunde abhängen und unter ganz speziellen Bedingungen, also gewissermaßen nur ausnahmsweise, der Anzahl der Unterbrechungen gleich werden. Unter allen Umständen handelt es sich dabei um objektive Töne, deren physikalische Herkunft sich leicht und evident durch Resonanzversuche erweisen läßt und deren Erklärung also kein physiologisches Problem ist.

IV. Von den Tonempfindungen in musikalischer Beziehung.

Wenn wir von irgend einem Ton mittlerer Höhe, z. B. vom a^1 mit 435 Schwingungen [3]), ausgehend den nächst höheren und nächst tieferen, von a^1 eben unterscheidbaren Ton aufsuchen, so gelangen wir nach dem früher über die Unterschiedsempfindlichkeit in dieser Region Mitgeteilten etwa zu den Schwingungszahlen 434,6 und 435,4 und schreitet man in gleicher Weise einerseits abwärts, andererseits aufwärts weiter, so erhält man schließlich die ganze Reihe der physiologisch nebeneinander möglichen Töne, bezogen auf den Ausgangston 435. Eine derartige Serie von Tönen, deren jeder von seinen beiden Nachbarn eben merklich verschieden ist,

---

[1]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiolog. Abteil., Supplementband 1900, S. 60. — [2]) Drudes Ann. d. Physik **13**, 996, 1904. — [3]) Das eingestrichene a ist der sogenannte Kammerton, die Normaltonhöhe, nach der die Instrumente des Orchesters gemeinsam gestimmt werden. Die Schwingungszahl des Kammertones ist im Laufe der Zeit öfter gewechselt worden. Nach der Pariser Stimmung von 1788 war sie 409, nach der älteren Mozartstimmung etwa 421 usw. Gegenwärtig wird das a^1 meist zu 435 Schwingungen genommen.

besteht aus einer sehr großen Menge von Gliedern. Allein die eingestrichene Oktave würde mehr als 1200 einzelne Töne umfassen.

Bilden wir dagegen von a^1 aus nach oben und unten die Reihe der musikalisch in Betracht kommenden Töne, so ergibt sich eine viel geringere Anzahl. Die tiefsten und höchsten physiologischen Töne benutzt die Musik überhaupt nicht und von den übrigen nur solche, deren Schwingungszahlen zueinander in bestimmten Verhältnissen stehen. Eine Oktave des temperierten Klaviers enthält nur 12, nicht 1200, verschiedene Töne.

Die wichtigsten Schwingungszahlenverhältnisse oder Intervalle sind: Prime (1:1), Sekunde (8:9), kleine Terz (5:6), große Terz (4:5), Quarte (3:4), Quinte (2:3), kleine Sexte (5:8), große Sexte (3:5), kleine Septime (5:9), große Septime (8:15). Jeder einigermaßen musikalische Hörer wird diese und andere Intervalle voneinander unterscheiden und ein und dasselbe Intervall, sagen wir die große Terz, als solche erkennen, mag sie in der kleinen oder zweigestrichenen Oktave angegeben werden, mag sie aus den Tönen *c* und *e* oder *g* und *h* bestehen. Es kommt eben nur auf das Verhältnis der Tonhöhen, nicht auf die absoluten Werte, d. h. auf die Lage der Töne in der Tonskala, an, sofern es sich nicht gerade um obertonarme tiefste oder ganz hohe Töne handelt, denen gegenüber unser Intervallurteil ebenso versagt wie die Unterschiedsempfindlichkeit.

a) Konsonanz und Dissonanz.

Unsere musikalische Auffassung teilt die Intervalle in zwei Gruppen ein, in konsonante und dissonante. Schon in der griechischen Musiklehre, welche auf die Pythagoreer, vielleicht gar auf ägyptische Einflüsse zurückgeht, wurden die „symphonischen" von den „diaphonischen" Intervallen gesondert und zu den ersteren Oktave, Quinte und Quarte, zu den letzteren die anderen einschließlich der Terzen gezählt. Die Oktave wurde von jeher als die vollkommenste Konsonanz bezeichnet, während sich im übrigen die Anschauungen über die Grade der Konsonanz in der historischen Entwickelung der Musik wiederholt verschoben haben. Die heutigentags dem allgemeinen Geschmack am besten gerecht werdende Reihenfolge der Konsonanzen dürfte folgende sein: Oktave, Quinte und Quarte, große Terz und große Sexte, kleine Terz und kleine Sexte.

Als Ursache der Konsonanz ist vielfach die relative Einfachheit der Schwingungszahlenverhältnisse der konsonanten Intervalle angesehen worden; so von Descartes, Leibniz und Euler. Leibniz nannte die Musik geradezu ein verborgenes Rechnen des Geistes, welcher zwar nichts von der Zählung wisse, aber doch das Ergebnis als ein Vergnügen bei den Konsonanzen und als Mißvergnügen bei den Dissonanzen fühle. Daß derartige Hypothesen das Verlangen nach einer positiven Erklärung nicht zu befriedigen vermögen, liegt auf der Hand. Außerdem erheben sich sofort Einwände. Warum bleiben z. B. ganz schwache Verstimmungen von Konsonanzen unbemerkt, während die Zahlenverhältnisse dabei am kompliziertesten sind? Weshalb spricht man nicht auch von Konsonanz und Dissonanz auf dem Gebiete der Farbenempfindungen, wo es doch ebensogut zählbare Schwingungsverhältnisse gibt? Ähnliche Bedenken stehen der Lehre von der unbewußten Wahrnehmung des Schwingungsrhythmus, der periodischen Koinzidenz der Tonimpulse, entgegen, wie sie neuerdings von Opelt, Engel, Polak und am präzisesten formuliert von Th. Lipps[1]) entwickelt worden ist.

Eine exakt wissenschaftliche Begründung der Konsonanz und Dissonanz hat Helmholtz in seiner Lehre von den Tonempfindungen zu geben versucht. Nach ihm beruht die Dissonanz auf einer durch merkbare Schwebungen verursachten Störung im glatten Flusse des Klangeindruckes. „Dissonanz ist eine intermittierende Tonempfindung", und jede „intermittierende Erregung greift unsere Nervenapparate heftiger an als eine gleichmäßig andauernde". Je weniger rauh und unangenehm ein Zweiklang durch Schwebungen von Partial- oder auch Kombinationstönen gemacht wird, um so mehr nähert er sich der Konsonanz, die „eine kontinuierliche

[1]) Psychol. Studien, 1885.

Tonempfindung" ist. Die Konsonanz hängt aber bei Helmholtz auch mit der Klangverwandtschaft zusammen. Zwei Grundtöne sind um so verwandter, je mehr gemeinschaftliche Obertöne sie haben. Im höchsten Maße gilt dies von Grundtönen, die im Oktavenverhältnisse stehen, da in diesem Falle die Teiltöne beider Klänge sich decken. Hierbei sind Obertonschwebungen ganz ausgeschlossen und ist die Konsonanz die größtmögliche. Schreitet man in der Reihe der abnehmenden Konsonanzen, Quinte, Quarte, Terz, fort, so nimmt auch von Stufe zu Stufe die Zahl der koinzidierenden Obertöne ab, während die Möglichkeit von Teiltonschwebungen mehrfach vorhanden ist. Die Verringerung der Konsonanz geht also mit der Verringerung der Verwandtschaft parallel.

Wie die Helmholtzsche Theorie Vorläufer gehabt hat, so ist sie auch nicht ohne Kritiker geblieben. Der hervorragendste und sorgfältigste unter den letzteren ist C. Stumpf[1]). Gegen die Definition, Konsonanz sei eine kontinuierliche, Dissonanz eine intermittierende Tonempfindung, macht er in erster Linie geltend, daß ein Tremolo mit Oktaven oder mit Quinten diese Intervalle in intermittierende, aber nicht in dissonante verwandle. Es gibt also Intermittenzen ohne Dissonanz, ebenso aber auch Dissonanz ohne Schwebungen. So liefert eine Stimmgabel von 500 Schwingungen mit einer von 700 oder diese mit einer von 1000 eine Dissonanz, ohne daß von Schwebungen oder Rauhigkeit etwas zu bemerken wäre. Ein sehr bequemes Mittel, Dissonanz ohne Schwebungen herzustellen, und zwar auch schon bei Ganzton- und Halbtonintervallen, bietet ferner die Verteilung zweier Stimmgabeln an beide Ohren, bei welcher, passende Wahl der Gabeln und des Anschlages vorausgesetzt, die Rauhigkeit verschwindet, die Dissonanz aber bleibt. Endlich ist zu erwähnen, daß Schwebungen auch bei konsonanten Intervallen vorkommen, die trotzdem nicht dissonant werden, und daß wohl die Art der ein und dasselbe Intervall begleitenden Schwebungen, nicht aber der Dissonanzgrad mit der Höhenlage des Intervalles wechselt. Die Schwebungen haben wohl einen Einfluß auf den Grad der Annehmlichkeit, auf die Gefühlswirkung eines Klanges, nicht aber auf die Dissonanz. Auch dem zweiten Merkmal der Konsonanz bei Helmholtz, dem Zusammenfallen der Teiltöne, das überdies nur für gleichzeitige Klänge, nicht für aufeinanderfolgende, in Betracht kommt, muß nach den Darlegungen Stumpfs eine entscheidende Bedeutung abgesprochen werden. Denn hiernach wäre der Konsonanzgrad irgend eines bestimmten Intervalles von der Klangfarbe abhängig, was mit den musikalischen Beobachtungstatsachen nicht vereinbar ist.

Nach der Theorie von A. v. Oettingen[2]) sind verwandt (im ersten Grade) Klänge, welche entweder gleiche Teiltöne haben oder welche Teiltöne eines und desselben Grundtones sind. Im letzteren Falle spricht Oettingen von Tonizität und nennt den gemeinsamen Grundton Tonika; im ersteren Falle spricht er analog von Phonizität und Phonika. Seine Theorie gelangt dann vom Verwandtschaftsbegriff zum Begriff der Konsonanz, die entweder eine tonische oder eine phonische sein kann. Allein auch hier führt die Verwendung der Obertöne zu Widersprüchen mit gewissen Tatsachen, ebenso wie die von H. Riemann aufgestellte und zur Erklärung der Konsonanz herangezogene Untertonlehre sich nicht als stichhaltig erwiesen hat[3]).

Eine wirklich fruchtbare Theorie der Konsonanz und Dissonanz wird definitiv von dem Zurückgreifen auf die Obertöne Abstand nehmen müssen. Während F. Krueger in einer noch nicht vollständig erschienenen Abhandlung[4]), worin er zum Teil an einen älteren Beitrag Preyers[5]) zur Theorie der Konsonanz anknüpft, wenigstens den Differenztönen, welche nach ihm unabhängig von den Obertönen sind, einen wichtigen Einfluß auf die Konsonanz oder Dissonanz eines Intervalles zuschreibt, sucht die Theorie von Stumpf[3]) die Ursache der Konsonanz bzw. Dissonanz in den Empfindungseigentümlichkeiten der Grundtöne selbst

---

[1]) Beiträge zur Akustik u. Musikwissenschaft 1 (1898). (Daselbst zahlreiche weitere, auch auf das Folgende bezügliche Literaturangaben.) — [2]) Harmoniesystem in dualer Entwickelung, 1866. — [3]) Vgl. hierzu Stumpf, Beitr. z. Akustik und Musikwissensch. 1. — [4]) Differenztöne und Konsonanz, Arch. f. d. ges. Psychologie 1 u. f. — [5]) Akust. Untersuch., S. 44, Jena 1879.

und findet sie in deren größerer oder geringerer Verschmelzung.

Unter Verschmelzung versteht Stumpf den eigentümlichen, graduell abgestuften Charakter der Einheitlichkeit, welcher dem Eindruck zweier gleichzeitiger Tonempfindungen anhaftet. Auch auf dem Gebiete anderer Empfindungen, z. B. des Geruchs und Geschmacks, finde sich ähnliches, am deutlichsten aber innerhalb des Tonsinnes. Die Folge dieses Verhältnisses ist, daß die stärker verschmelzenden Intervalle unter sonst gleichen Umständen immer schwerer analysiert werden, wofür besonders Versuchsreihen an Unmusikalischen Belege bieten. Der Verschmelzungsgrad eines Intervalles geht demjenigen der Konsonanz parallel. Er ist innerhalb des musikalisch in Betracht kommenden Teiles der Tonskala unabhängig von Höhenlage und Stärke der Teiltöne des Intervalles und kommt auch bloß vorgestellten Tönen zu. Die Erklärung der Verschmelzung muß nach Stumpf auf physiologischem Gebiete liegen. Man wird anzunehmen haben, daß beim gleichzeitigen Erklingen oder Vorstellen zweier Töne, deren Schwingungszahlenverhältnis relativ einfach ist, im Gehirn zwei Prozesse stattfinden, die in einer engeren Verknüpfung (einer spezifischen Synergie) zueinander stehen, als wenn weniger einfache Intervallverhältnisse gegeben sind. Worin das Wesen dieser spezifischen Synergie besteht, darüber läßt sich zurzeit freilich noch nichts Näheres sagen.

b) Tonverwandtschaft und Leiterbildung.

Im Gegensatz zu v. Oettingen leitet Stumpf die Verwandtschaft der Töne aus der Konsonanz ab. Direkt verwandt oder verwandt im ersten Grade sind zwei Töne, welche miteinander konsonieren, also in höheren Graden verschmelzen. Indirekt verwandt, und zwar verwandt im zweiten Grade, nennt Stumpf zwei Töne, deren jeder mit einem und demselben dritten Tone konsoniert, z. B. *c* und *h* (durch *g* verwandt) oder *c* und *cis* (durch *a* oder *e* verwandt). Überhaupt sind immer je zwei Töne indirekt verwandt, wenn sie durch einen oder mehrere Töne untereinander derartig verbunden werden können, daß jeder Ton der Reihe mit seinen Nachbarn konsoniert, und zwar ist die Verwandtschaft dabei sovielten Grades, als konsonante Intervalle zwischen dem ersten und letzten Gliede der Reihe liegen.

Wie schon oben hervorgehoben wurde, wird aus der unendlichen Zahl an sich möglicher Tonkombinationen für den musikalischen Gebrauch eine relativ kleine Anzahl fester Stufen als allein verwendbar ausgeschieden. Die Veranlassung hierzu ist die Tonverwandtschaft; sie ist die psychologische Grundlage für die Existenz und den Aufbau der Tonleitern. In der diatonischen *C-Dur*-Leiter *c d e f g a h* c^1 sind, wie man leicht sieht, alle Töne entweder direkt oder indirekt mit der Tonika *c* verwandt. So gelangt man beispielsweise von *c* zu c^1 oder *g* direkt, zu *d* durch einen Quintenschritt aufwärts und einen Quartschritt abwärts oder durch zwei Quintenschritte (bis d^1) aufwärts und einen Oktavenschritt abwärts. In beiden Fällen erhalten wir für *d* dieselbe Tonhöhe, da das eine

	C	*Cis*	*Des*	*D*	*Dis*	*Es*	*E*	*Fes*	*Eis*	*F*	*Fis*	*Ges*	*G*	*Gis*	*As*	*A*	*Ais*	*B*	*H*	*Ces*	*His*
—		$\frac{T}{t}$	$\frac{q}{T}$	$\frac{q}{t}$	$\frac{TT}{q}$	t	T	$\frac{s}{T}$	$\frac{TT}{t}$	q	$\frac{S}{t}$	$\frac{QT}{q}$	tt	Q	TT	s	S	$\frac{ST}{t}$	qq	Qt	QT	st	TTT
1		25/24	16/15	10/9	75/64	6/5	5/4	32/25	125/96	4/3	25/18	45/32	36/25	3/2	25/16	8/5	5/3	125/72	16/9	9/6	15/8	48/25	125/64

Mal (c gleich 132 Schwingungen gesetzt, was dem Kammerton 440 entsprechen würde) $d = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot 132 = \frac{9}{8} \cdot 132$, das andere Mal $d = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 132 = \frac{9}{8} \cdot 132$ ist. Gehen wir dagegen von c eine Quarte aufwärts und eine kleine Terz abwärts, so bekommen wir ein anderes $d = \frac{4}{3} \cdot \frac{5}{6} \cdot 132 = \frac{10}{9} \cdot c$. Ebenso resultiert ein anderes e durch den natürlichen Terzschritt 5 : 4, als wenn wir von c aus vier Quinten aufwärts und zwei Oktaven abwärts schreiten (pythagoreische Terz). Zwei große Terzschritte von c aus führen uns zu einem zwischen g und a gelegenen Tone *gis*; ein großer Terzschritt aufwärts, ein kleiner Terzschritt wieder abwärts zu *cis*; ein Quartschritt vorwärts und ein großer Terzschritt zurück zu *des*; ein kleiner Terzschritt vorwärts zu *es*. So entwickelt sich schließlich die auf voriger Seite stehende Leiter [1]). Man kann sie, um dem Bedürfnis nach einem kurzen Ausdruck zu genügen, als enharmonische Leiter bezeichnen. Sie enthält vor allem (fettgedruckt) die Töne der diatonischen Dur- und Mollleiter, wie sie aus den Dreiklängen mit großen und mit kleinen Terzen auf *C*, *F* und *G* resultieren. Von Alterationen (Erhöhungen und Vertiefungen) sind nur solche aufgenommen, welche in der Musik durch ein einfaches ♯ oder ♭ ausgedrückt werden. Die Wahl der Töne gründet sich auf bestimmte in der Praxis wurzelnde Überlegungen. Natürlich wären an sich noch mehr und andere Töne innerhalb der Oktave von c aus zu gewinnen gewesen, und man kommt jedenfalls zu solchen, wenn man einen anderen Ton der Leiter als c zur Tonika und zum Ausgangston einer neuen Leiter wählt.

Den zahlreichen musikalischen Intervallen, in welche sich die Oktave theoretisch nach diesem oder einem anderen Prinzip einteilen läßt, kann man praktisch wohl bis zu einem gewissen Grade bei Benutzung solcher Instrumente gerecht werden, welche, wie die menschliche Stimme oder die Geige, keine konstanten Tonhöhen haben. Bei dem Klavier, dem Harmonium, der Orgel, überhaupt bei allen Instrumenten mit festen Tönen würde man aber zu diesem Zwecke eine verwirrende Menge einzelner Töne nötig haben. Um diesem Übelstande zu entgehen, hat man seit lange zu dem Auskunftsmittel gegriffen, alle nur wenig verschiedenen Töne, wie beispielsweise *cis* und *des*, zusammenzulegen und sog. temperierte Leitern zu bilden. So ist die Oktavenskala unseres Klaviers eine zwölfstufige gleichschwebend temperierte. Sie heißt gleichschwebend, weil alle Intervalle zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Tönen gleich groß, nämlich $1 : \sqrt[12]{2}$, sind. Unter ungleichschwebenden Temperaturen versteht man solche, bei denen einige besonders wichtige Intervalle mathematisch rein und nur die übrigen gegeneinander abgeglichen sind. Bei diesen ist aber dafür die Abweichung von der Reinheit um so größer und störender. An den Grenzen der Wahrnehmbarkeit liegen die Unreinheiten bei der von Mercator vorgeschlagenen, von Bosanquet [2]) an seinem Harmonium praktisch ausgeführten 53stufigen gleichschwebenden Temperatur.

c) Intervallsinn und absolutes Tonbewußtsein.

Die zwölfstufige gleichschwebende Temperatur ist gegenwärtig allgemein üblich. In dieser Stimmung sind freilich die großen Terzen etwas zu groß, die kleinen zu klein; auch die Quinten sind ein wenig zu klein, obgleich die Differenz hier geringer ist. Aber es trifft sich günstig, daß eine gewisse psychologische Eigentümlichkeit hinsichtlich des Intervallurteils besteht, die uns die Abweichung der Terzen weniger fühlbar macht.

Beobachtungen über die Empfindlichkeit des Ohres gegen die Unreinheit von Intervallen sind seit Delezenne (1827) von Cornu und Mercadier, von Preyer,

---

[1]) Vgl. C. Stumpf und K. L. Schaefer, Tontabellen; Stumpfs Beiträge zur Akustik und Musikwissensch. 3 (1901). — [2]) An Elementary Treatise on Musical Intervalls and Temperament, London, Macmillan, 1875.

Schischmánow u. a. veröffentlicht worden. Die Ergebnisse weichen indes zum Teil sehr voneinander ab, zum Teil beruhen sie auf unzuverlässiger Basis, wie aus den kritischen Erwägungen von Stumpf und Meyer[1]) hervorgeht. Die Letztgenannten haben den Gegenstand aufs neue untersucht und sind dabei zu folgenden Resultaten gelangt. Die früher so gut wie allgemein angenommene Regel, Abweichungen von der Reinheit eines Intervalles seien um so merklicher, je vollkommener die Konsonanz, ist nicht richtig. Der kleinen Terz gegenüber zeigte sich die Neigung, das physikalisch reine Intervall etwas zu hoch zu schätzen; subjektiv rein erschien die kleine Terz erst bei einer Verkleinerung der Tondistanz von etwa $1^1/_2$ Schwingungen. Dagegen trat bei der großen Terz, noch mehr bei der Quinte und am meisten bei der Oktave die Tendenz zu einer Vergrößerung zutage. Die subjektiv reine große Terz übertraf die objektive um 0,43 Schwingungen im Mittel, und für Quinte und Oktave ergaben sich als entsprechende Werte + 0,81 und + 0,95. Gleich große Abweichungen von der subjektiven Reinheit wurden bei diesen drei Intervallen mit gleicher Sicherheit beurteilt. Alle diese Angaben beziehen sich auf mittlere Tonlagen und aufeinanderfolgende Töne. Die Intervalle gleichzeitiger Töne werden viel schlechter geschätzt. Als das Kriterium für die Beurteilung eines Intervalles bezüglich seiner Reinheit oder Unreinheit betrachtet Stumpf ein angeborenes und der individuellen Entwickelung fähiges eigenes Reinheitsgefühl, das sich bei Vergrößerungen als eine Art Spannung, Schärfe, Überreizung, bei Verkleinerungen als Mattigkeit oder Schalheit äußert.

Die Fähigkeit, ein gegebenes Intervall richtig zu benennen oder ein verlangtes zu singen, ist ziemlich verbreitet und jedem musikalisch Veranlagten eigen. Seltener dagegen ist jene Begabung, welche man mit dem Ausdruck absolutes Gehör oder absolutes Tonbewußtsein bezeichnet und welche erst in neuerer Zeit bei den Autoren das wohlverdiente Interesse in größerem Maße gefunden hat[2]). Sie besteht in dem Vermögen, einen ohne Verbindung mit anderen gehörten Ton mit dem für ihn gebräuchlichen Buchstaben zu benennen, und anderseits einen Ton, dessen Buchstabenbezeichnung angegeben wird, aus dem Gedächtnis durch Singen oder Pfeifen zu produzieren. Manchen Personen sind beide Fähigkeiten zugleich eigen. Viele aber besitzen nur die erstere, andere nur die zweite. In dem einen Falle handelt es sich um die Reproduktion der Wortvorstellung durch die Tonempfindung, und zwar taucht die Wortvorstellung unmittelbar auf, nicht etwa erst infolge einer wissentlichen Vergleichung mit irgend einem Tonerinnerungsbilde. In dem anderen Falle löst die Wortvorstellung die Tonvorstellung aus, jedoch nach den Angaben von Abraham nicht direkt, sondern auf einem Umwege über vermittelnde Vorstellungen. Die Erkennbarkeit der absoluten Tonhöhe erstreckt sich bei einigen über die ganze musikalische Region des Tonreiches, wobei allerdings Täuschungen bezüglich der Oktave, welcher der richtig benannte Ton angehört, vorkommen. Bei anderen beschränkt sich das absolute Tonbewußtsein auf wenige Oktaven oder gar auf einzelne Töne, worunter dann häufig der Kammerton ist. Individuen der letzteren Gattung erkennen die Höhe eines gehörten Tones oft von dem ihnen geläufigen aus mit Hilfe des Intervallsinnes. Was den Einfluß der Tonintensität auf die absolute Tonbeurteilung anlangt, so hat Abraham gefunden, daß es ein Stärkeoptimum gibt, welches zwischen dem Stärkemaximum und -minimum, aber diesem beträchtlich näher liegt; eine besondere Dauer des Tones erwies sich als nicht erforderlich für das Höhenurteil, die Dauerschwelle ist vielmehr dieselbe wie für die Tonwahrnehmung überhaupt. Von ganz hervorragendem Einfluß ist die Klangfarbe, wie schon v. Kries betonte. Viele Musiker können nur die Töne bestimmter Instrumente mit voller Sicherheit sofort benennen, während ihr absolutes Tongedächtnis anderen gegenüber völlig versagt. Das am leichtesten zu beurteilende Instrument scheint das Klavier zu sein; Stimmgabeln, gesungene Töne,

---

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **18**, 321, 1898. — [2]) Literatur: Stumpf, Tonpsychologie; v. Kries, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **3**, 257, 1892; Naubert, Das absolute Tonbewußtsein, Der Klavierlehrer 1898; M. Meyer, Psychol. Review **6**, 1899; O. Abraham, Das absolute Tonbewußtsein, Sammelbände d. Internat. Musikgesellsch. **3**, 1901/02.

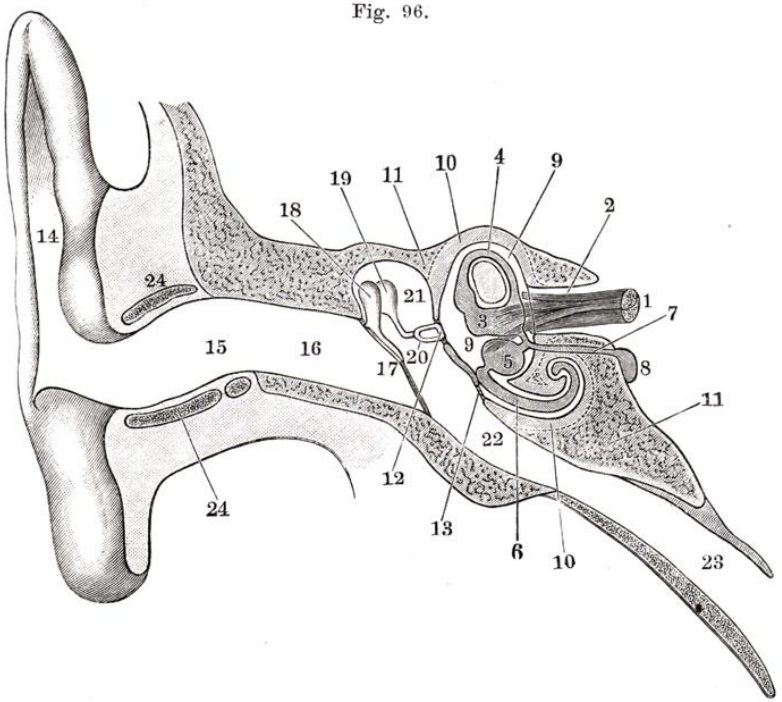
Glocken und Gläser bieten am meisten Schwierigkeiten. Offenbar hängt dies mit der Zahl und der Stärke der Teiltöne des jeweils zu erkennenden Klanges zusammen, wenn auch die Beziehungen im einzelnen noch nicht ganz klar sind. Möglicherweise beurteilt man nicht den Grundton für sich, sondern in Gemeinschaft mit seinen nächsten, mit ihm ein Ganzes bildenden, Obertönen. — Das absolute Tonbewußtsein wird zumeist von seinem Besitzer schon in der Kindheit als vorhanden erkannt. Seine Erlernbarkeit scheint nur gering zu sein.

V. Spezielle Physiologie des Gehörorgans.

a) Anatomische Vorbemerkungen.

Das Gehörorgan zerfällt in drei Teile, das äußere Ohr, welches die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang umfaßt, das Mittelohr, das auch Trommelhöhle oder Paukenhöhle *(Cavum tympani)* genannt wird, und das im Felsenbein gelegene innere Ohr oder Labyrinth. Das Mittelohr ist gegen das äußere durch das trichterförmig eingezogene Trommelfell, gegen das innere durch die knöcherne Wandung des letzteren, bzw. die darin gelegenen Fenster abgegrenzt; es ist eine lufthaltige, mit dem Nasen-Rachenraum durch die Ohrtrompete *(Tuba Eustachii)* kommunizierende Höhle, durch die sich quer hin-

Fig. 96.



durch vom Trommelfell zum ovalen Fenster die Gehörknöchelchenkette spannt. Das Labyrinth ist ein mit Flüssigkeit, Lymphe, gefüllter Raum, dessen mittlerer Teil der Vorhof *(Vestibulum)* heißt. Aus diesem gehen nach hinten gerichtet die drei sogenannten Bogengänge hervor, nach vorn der Schneckenkanal, der in $2^3/_4$ Spiralwindungen um seine Achse gewickelt ist.

Fig. 96 gibt eine schematische Darstellung dieser Verhältnisse. Darin ist 1 der Hörnerv, welcher durch den inneren Gehörgang (2) zum Labyrinth tritt, 3 der *Utriculus*, welcher mit dem *Sacculus* (5) zusammen im Vorhof liegt, 4

einer der drei Bogengänge, 6 die häutige Schnecke *(Ductus cochlearis)*, 7 der *Ductus endolymphaticus*, 8 der *Saccus endolymphaticus*, 9 der perilymphatische Raum, 10 das knöcherne Labyrinth, 11 das Felsenbein, 12 die *Fenestra ovalis*, in der mittels seines Ringbandes der Steigbügel beweglich befestigt ist, 13 die durch eine *Membrana tympani secundaria* geschlossene *Fenestra rotunda*, 14 die Ohrmuschel, 15 und 16 der knorpelige (24) und knöcherne Teil des äußeren Gehörganges, 17 das Trommelfell, 18 der Hammer *(Malleus)*, 19 der Amboß *(Incus)*, 20 der Steigbügel *(Stapes)*, 21 bis 23 die Pauke nebst Tube. Fig. 97 zeigt die Ohrmuschel und ihre einzelnen Teile im Profil gesehen. Die mit dem Stern versehene Stelle ist das *Tuberculum supratragicum*.

Fig. 97.

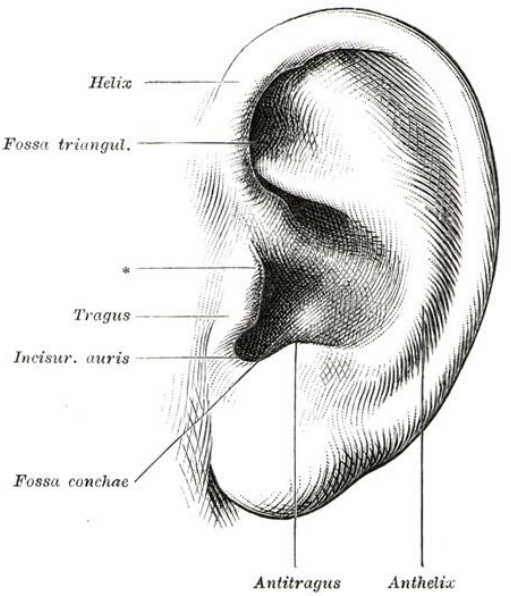


Fig. 98 gibt den Zusammenhang der drei Gehörknöchelchen untereinander wieder. Der Stiel des Hammers (das *Manubrium*) ist mit dem Trommelfell verwachsen. Sein langer Fortsatz *(Proc. longus s. anterior s. folianus)* ist beim Erwachsenen meist in ein Ligament verwandelt und dient zur Befestigung des Knöchelchens *(Lig. anterius)*. Außer diesem vorderen Ligament besitzt der Hammer noch ein nach hinten gerichtetes *(Lig. posterius)*, das mit ersterem zusammen einen mäßig gespannten,

Fig. 98.

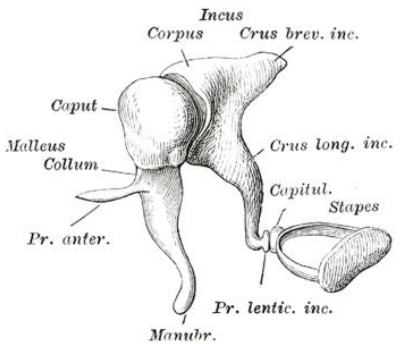
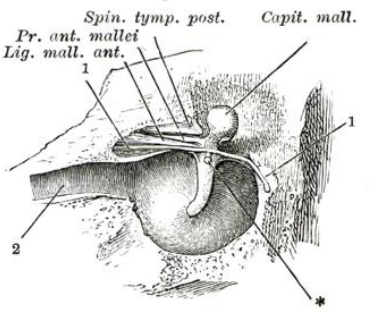


Fig. 99.



am Hals des Hammers inserierenden Sehnenstrang bildet, um den sich der Hammer wie um eine Achse drehen kann (Achsenband), ferner ein gerade nach außen gegen den oberen knöchernen Rand des Trommelfells ziehendes *Lig. externum* und ein *Lig. superius*, dessen Fasern sich nach Helmholtz vom langen Fortsatz aus nach oben in eine schmale Spalte begeben, die, wie Fig. 99 erkennen läßt, zwischen Hammerkopf und Paukenhöhlenwand bleibt. Der kurze Fortsatz des durch ein eigentümliches Gelenk mit dem Hammerkopfe verbundenen Amboßkörpers stützt sich mit seiner überknorpelten Spitze auf eine Hervorragung der hinteren Wand der Paukenhöhle. Dieses Amboß-Paukengelenk ist eine Amphiarthrose und wird von manchen nur als Bandverbindung angesehen. Der Steigbügel fügt sich

mit seinem *Capitulum* mittels einer Gelenkverbindung an den *Processus lenticularis (Ossiculum Sylvii)* des Amboßstieles an.

Fig. 99 (a. v. S.) zeigt das Trommelfell nebst Hammer von innen betrachtet. 1 ist die durch die Paukenhöhle gehende *Chorda tympani*, ein den *Nervus facialis* mit dem *Nervus lingualis* verbindender Nervenstrang, 2 ist die Tube. An der durch einen Stern gekennzeichneten Stelle setzt sich die Sehne des Trommelfellspanners an den Hammer an.

Der Verlauf des Trommelfellspanners, *Musc. tens. tymp.*, geht aus Fig. 100 hervor. Der Muskelbauch ist durch das Septum (2) von der Tube (3) getrennt; seine Sehne durchsetzt die Paukenhöhle. Im übrigen sieht man in der Figur 100 wieder die Chorda (1), den Hammer, den Amboß und das Trommelfell (4), dessen nach innen gerichtete Trichterspitze, der Nabel, dem unteren Ende des Hammers entspricht (siehe die gesternte Stelle).

Fig. 100.

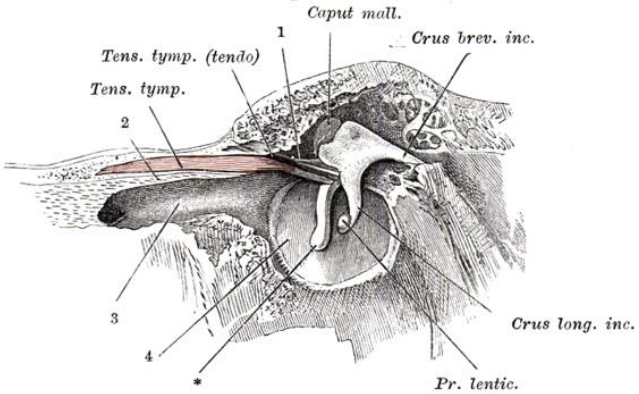
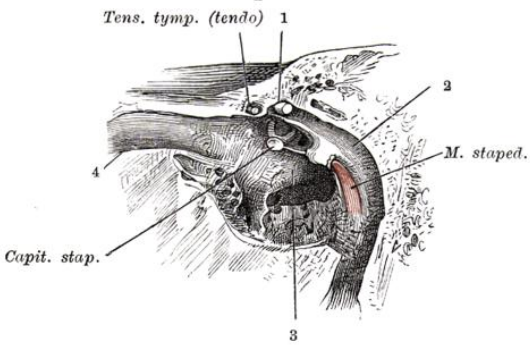


Fig. 101.



Die Tensorsehne ist (abgeschnitten) auch in Fig. 101 sichtbar, die hauptsächlich den Steigbügelmuskel, den *Stapedius*, darstellen soll. Derselbe entspringt im Grunde der (geöffnet abgebildeten) *Eminentia stapedii* und sendet durch die Öffnung an der Spitze derselben seine dünne Sehne zum Köpfchen des *Stapes* bzw. zum Amboß-Steigbügel-Gelenk. Ferner ist in der Figur der Steigbügel selbst, der Stumpf des *Nervus facialis* (1), der Facialiskanal (2), das sog. Promontorium (3), eine Vorwölbung der Paukenhöhlenwand, und die Tube (4) zu sehen.

Der dem Mittelohr zunächst gelegene Teil der Tube ist knöchern, die Fortsetzung bis zur Rachenmündung knorpelig. Die eigentümlich rinnenförmige bzw. auf dem Querschnitt hakenförmige Gestalt des nur eine Wand der Tube bildenden Knorpels veranschaulichen die Fig. 102 und 103. In ersterer, einer Abbildung der Schädelbasis, ist der Knorpel durch einen Stern markiert. Er beginnt in der Gegend der *Spina angularis* und setzt, wie die Betrachtung der Lage des äußeren Gehöreinganges zeigt, im ganzen die Richtung des Paukenhöhlenlumens fort. Fig. 103 A ist ein Tubenquerschnitt dicht vor der Verbindung des knorpeligen Teiles mit dem knöchernen, B ein Querschnitt am vorderen Rande der *Spina angularis*, C ein solcher in der Gegend des *Foramen ovale*. Die Sterne bedeuten den

Fig. 102.

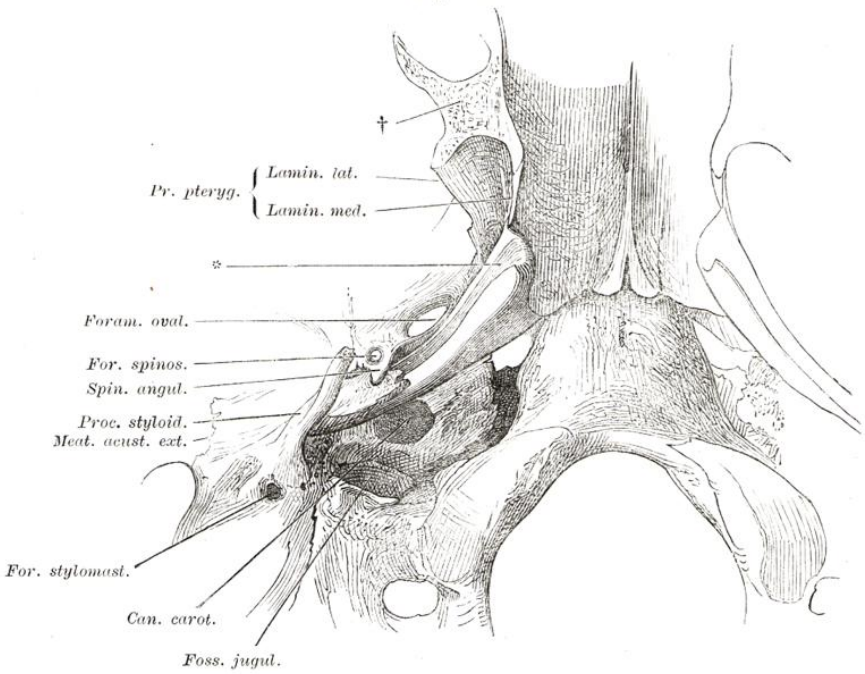
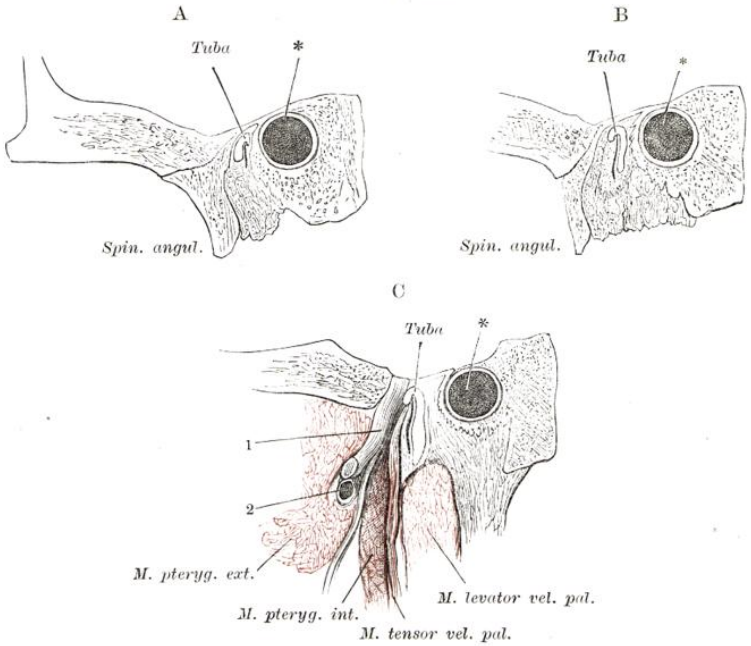


Fig. 103.



Durchschnitt der *Arteria carotis*, 1 ist der *Nervus inframaxillaris*, 2 die *Arteria meningea media*. Das spaltförmige Lumen der Tube kann erweitert, die Tube geöffnet werden, wenn der *Musculus tensor veli palatini s. sphenostaphylinus*, dessen Fasern sich an die äußere Fläche des umgebogenen Teiles anheften, eine Kontraktion vollführt, wie das beim Schlingen der Fall ist. Politzer ist auf Grund von Trigeminusreizungen, Tröltsch auf Grund anatomischer Studien für diese Wirkung des *Tensor veli* eingetreten. Hensen[1]) findet dagegen in Übereinstimmung mit älteren Angaben von Henle und Rüdinger die Funktion des Muskels als Tubeneröffner fraglich und macht darauf aufmerksam, daß bei den kaltblütigen Wirbeltieren die Tuben weit offen ständen und daher ein ausgeprägter Muskelmechanismus aus phylogenetischen Gründen nicht zu erwarten sei.

Einen Durchschnitt durch den Schneckenkanal und seine Achse (Spindel, Modiolus) zeigt in dreifacher Vergrößerung Fig. 104. Von der Basis her tritt der *Nervus cochlearis* — der andere Teil des *Nervus acusticus* geht als *Ramus vestibularis* zu Vorhof und Bogengängen — in die Spindel und weiter in die Scheidewand, die durch die ganze Länge des Kanals diesen in zwei Treppen, *Scala vestibuli* und *Scala tympani*, teilt. Der der Spindel zugekehrte Teil dieser Scheidewand ist knöchern *(Lamina spiralis)*. Die Lamina erhebt sich nur bis etwa zur Mitte des Kanals. Von ihrer freien Kante aus gehen divergierend zwei Membranen, von denen die eine die direkte Fortsetzung der Lamina bildet. Es ist dies die Basilarmembran, auf der die Endausbreitung des

Fig. 104.

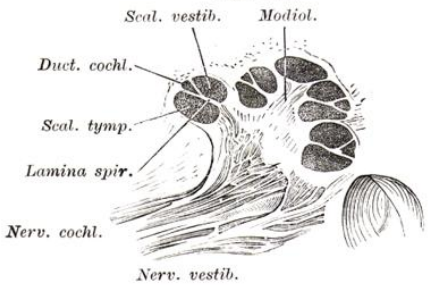
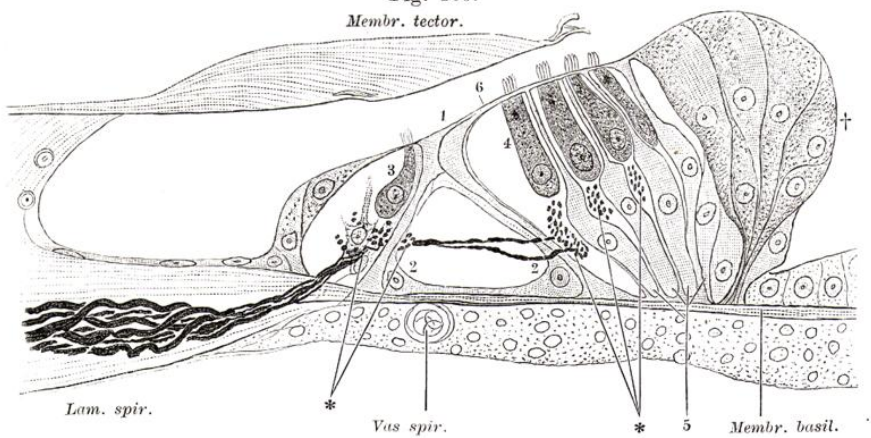


Fig. 105.



Hörnerven, das Cortische Organ, aufgelagert ist. Die andere Membran heißt die Reissnersche oder Vestibularmembran. Beide umschließen zusammen mit einem Teil der Kuppel des Kanals einen im Querschnitt dreiseitigen, durch die Schnecke sich hinwindenden Raum, den *Ductus cochlearis*. Das ovale Fenster sieht in die *Scala vestibuli*, das runde ist das untere Ende der *Scala tympani*. Beide Treppen sind in der ganzen Länge des Schneckenkanals durch den *Ductus cochlearis* getrennt. Nur in der Schneckenspitze, wo die *Lamina spiralis* in Form eines freien, scharfen Hakens (Hamulus) endigt, findet eine Kommunikation statt (Helicotrema).

Fig. 105 zeigt einen senkrecht zur Basilarmembran geführten Querschnitt des akustischen Endapparates. Oben ist die *Scala vestibuli*, unterhalb der Basilar-

[1]) Vgl. hierzu Hermanns Handb. d. Physiol. 3 (2), 58 u. 59, 1880.

membran die *Scala tympani* ergänzt zu denken. Bei 1 stoßen die beiden Cortischen Pfeiler aneinander, die zusammen den, einen Tunnelraum umschließenden, Cortischen Bogen bilden. Am Grunde desselben liegen (bei 2) die Bodenzellen. 3 und 4 sind die mit Haaren versehenen Horzellen (Haarzellen, Deckzellen), deren äußere (4) auch Cortische Zellen heißen. Unter ihnen liegen (5) Stützzellen, auch Deitersche Zellen genannt. Außer letzteren dient zur Fixierung der Hörzellen die *Membrana reticularis* (6), die von den oberen Enden der Pfeiler ausgeht und in kreisrunden Öffnungen die Cilien tragenden Enden der Hörzellen aufnimmt. Über die Oberfläche des ganzen Zellkomplexes legt sich die *Membrana tectoria* (Cortische Membran). Bei † befinden sich wulstartig erhobene Epithelzellen (Hensensche Zellen). Links ziehen (schwarz dargestellt) durch die Lamina die Nervenfasern heran und zu den Hörzellen hin; an den mit Sternen gekennzeichneten Stellen sind Querschnitte der spiralig verlaufenden Nervenfasern zu sehen.

b) Die Funktion des äußeren Ohres.

Die Ohrmuschel und der äußere Gehörgang des Menschen sind Organe, denen eine umfassende und fundamentale Bedeutung für das Hören jedenfalls nicht zukommt. Dafür sprechen zunächst physiologische und pathologische Beobachtungen. Verstopft man die Gehörgangsöffnung möglichst fest, so werden freilich die durch die Luft geleiteten tieferen Töne stark geschwächt oder unhörbar gemacht, die höheren jedoch in um so geringerem Grade beeinträchtigt, je größer ihre Schwingungszahl ist. Für die Perzeption sehr hoher Töne ist es ziemlich gleich, ob das Ohr offen oder geschlossen ist, und für die tieferen ebenfalls, insoweit sie durch die Kopfknochen direkt dem Labyrinth zugeführt werden. Ist bei sonst intaktem Gehör die Ohrmuschel vollständig verloren gegangen, so ist anfangs das Hören merklich verschlechtert, der Mangel wird aber bald durch die Erlernung zweckmäßiger Kopfdrehungen ausgeglichen. Die bei angeborenem Fehlen des äußeren Ohres zu beobachtende Taubheit wird meist durch gleichzeitige innere Krankheitsprozesse bedingt.

Die Fische, die Amphibien und vor allem die Vögel, welche letztere doch unbestreitbar hören, haben überhaupt keine Ohrmuschel, wenn man von vereinzelten Ausnahmen absieht. Dagegen besitzen die Säugetiere bis auf gewisse im Wasser oder in der Erde lebende Arten, wie Walroß, Schnabeltier, Maulwurf und einige andere, im allgemeinen eine Ohrmuschel und zwar vielfach eine solche von tütenähnlicher Gestalt und elliptischer Form, die sich mit Hilfe zahlreicher Muskeln nach den verschiedensten Richtungen wenden, erweitern, verengern, verlängern und verkürzen läßt. Betrachtet man beispielsweise beim Pferde, dem 17 Muskeln zur Bewegung der Ohrmuschel zur Verfügung stehen, das lebhafte Spielen der letzteren, so wird man kaum zweifeln können, daß dieselbe geeignet ist, wie eine Art Hörrohr den Schall zu sammeln und auch zur Bestimmung der Schallrichtung zu dienen, indem sie so lange gedreht wird, bis ihre Öffnung der Schallquelle zugewendet und damit das Maximum der Hörstärke erreicht ist.

Die menschliche Ohrmuschel werden wir aber wohl mit Darwin als ein im Verlaufe der phylogenetischen Entwickelung verkümmertes Organ aufzufassen haben. Ihre Bildung erscheint zum Auffangen und Hineinleiten des Schalles in den Gehörgang nicht sonderlich zweckmäßig und die Beweglichkeit ist fast ganz verloren gegangen. Nur wenige Personen sind imstande, das Ohr sichtbar und ohne Mitbewegung der Kopfhaut nach vorn, oben oder

hinten zu richten, und noch viel seltener ist die Fähigkeit, beide Ohren zugleich und auf verschiedene Weise zu bewegen. In dem Spannungsgefühl, das die meisten in der Gegend des äußeren Ohres beim Lauschen empfinden, verrät sich dem Anschein nach noch eine gewisse Tendenz zu Ohrmuschelbewegungen; im allgemeinen indessen ist der Mensch darauf angewiesen, durch eine entsprechende Wendung des Kopfes gegen die Schallquelle das Optimum der Perzeption aufzusuchen, wenn eine Verstärkung der Schallwahrnehmung oder die genauere Richtungsbestimmung wünschenswert ist.

Unter diesen Umständen fragt es sich, ob unsere Ohrmuschel denn überhaupt einen irgendwie erheblichen Nutzen für das Hören hat. Viele, namentlich ältere, Autoren haben den äußeren Ohrknorpel als Reflektor aufgefaßt. So meinte Johannes Müller[1]), als solcher käme vorzüglich die Concha in Betracht, indem sie die aus der Luft auftreffenden Schallwellen gegen den Tragus werfe, der sie seinerseits in den Gehörgang reflektiere. Mach[2]) hat aber (zum Teil in Gemeinschaft mit A. Fischer[3]) Beweise dafür erbracht, daß hier von einer regelmäßigen Reflexion keine Rede sein kann. Eine reguläre Reflexion oder Brechung einer Wellenbewegung findet nur dann an einer Fläche statt, wenn die linearen Dimensionen der letzteren enorm groß gegenüber der Wellenlänge sind. Bei den Ätherschwingungen des Lichtes ist diese Bedingung jederzeit leicht erfüllbar; zwischen dem Flächeninhalte der Ohrmuschel und den Schallwellen, zumal der tieferen Töne, besteht aber vielmehr das umgekehrte Verhältnis.

Wenn wir während der Beobachtung eines von vorn kommenden leisen Schalles die leicht gekrümmten Hände von hinten gegen die Ohrmuscheln legen, so daß diese dadurch gleichsam vergrößert werden, wird der Schall alsbald merklich lauter. Ist nun auch diese Erscheinung nach den Untersuchungen Machs nicht durch Reflexion zu erklären, so steht doch ihre Tatsächlichkeit fest. Die eben beschriebene Wirkung der Hände müssen dann aber auch schon die Ohrmuscheln allein haben, obwohl freilich in verhältnismäßig geringerem Grade. In der Tat ist von mehreren Seiten[4]) angegeben, daß sich bei einzelnen Schwerhörigen eine deutliche Besserung der Hörweite nachweisen lasse, wenn die Muschel durch den hinten andrückenden Finger vorwärts geschoben würde, und daß überhaupt ihr Anheftungswinkel nicht ganz gleichgültig sei. In demselben Sinne sprechen die folgenden physiologischen Versuche. Schneider[5]) füllte seine linke Ohrmuschel mit einer Mischung von Wachs und Öl aus, so daß nur eine der Weite des äußeren Gehörgangs entsprechende Öffnung blieb. Dann wurden gerade von vorn oder hinten kommende Töne links schwächer gehört und demgemäß etwas nach rechts lokalisiert. Waren beide Ohren in der genannten Weise behandelt, so zeigte sich das Schlechterhören noch ausgesprochener, und am auffallendsten ward es, wenn auch noch der Raum zwischen Ohr und Hinterkopf beiderseits ausgefüllt wurde. Küpper[6]) fand bei völliger Verklebung der Muschel und Einführung eines Glas- oder Hörrohres in den Gehörgang

[1]) Handbuch d. Physiol. d. Menschen **2**, 452, Koblenz 1840. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **9**, 72, 1875. — [3]) Pogg. Ann. **149**, 421, 1873. — [4]) Vgl. O. Wolf, Sprache und Ohr, S. 185, Braunschweig 1871; Buchanan, Meckels Arch. f. Anat. u. Physiol. 1828. — [5]) Die Ohrmuschel und ihre Bedeutung beim Gehör, Dissert. Marburg 1855. — [6]) Arch. f. Ohrenheilk. **8**, 158, 1874.

ebenfalls eine Verringerung der Hörschärfe, während Harless [1]) eine solche bei einer ähnlichen, allerdings wenig zweckmäßigen Anordnung vermißt hatte. In der von Rinne [2]) ausgeführten Versuchsreihe, wobei eine Uhr als Schallquelle diente und der Ohrknorpel mit Brotteig bedeckt war, erwies sich der Einfluß der Muschel auf die Präzision des Gehörs ganz deutlich, und auch Kessel [3]) tritt für einen solchen ein, nachdem er sich überzeugt, daß die Hörweite in der Medianebene nach vorn ab- und nach hinten zunimmt, wenn man die Ohrmuschel an den Kopf preßt, also ihre Schirmwirkung verringert, daß die Hörweite dagegen bei normalem Abstehen der Ohren vom Kopfe nach vorn größer ist als nach hinten und daß endlich dieser Unterschied völlig verschwindet, wenn man den Eingang ins Ohr durch Einstecken einer Röhre in den Gehörgang aus dem Bereich der Muschel hinaus in den Raum verlegt.

Müller, Harless, Schneider u. a. haben die Auffassung vertreten, daß der Ohrknorpel zwar einen Teil der aus der Luft auftreffenden Schallwellen zurückwerfe, einen nennenswerten Teil aber auch aufnehme und zum Trommelfell weiter leite. Wieweit diese Ansicht zutrifft, wird sich kaum bestimmen lassen. So viel ist allerdings sicher, daß der Knorpel direkt auf ihn übertragene Schallwellen besser leitet als der Schädel. J. Müller machte diese Beobachtung mit Hilfe einer Pfeife, und ich kann dieselbe nach Stimmgabelversuchen nur bestätigen. Wenn eine fest gegen den Warzenfortsatz gedrückte a^1-Gabel an dieser Stelle abgeklungen ist, wird sie meist noch wieder hörbar beim Aufsetzen auf irgend einen Punkt der Ohrmuschel; besonders bevorzugt ist in dieser Beziehung der Tragus und namentlich dessen Vorderfläche: hier kann man die Gabel oft noch mehrmals abheben und wieder aufsetzen, ehe sie im letzteren Falle tonlos gefunden wird.

Einige Autoren haben Wert darauf gelegt, daß gewisse Partien der Ohrmuschel gewissen Tönen gegenüber als Resonatoren wirken. So fand Ch. H. Burnett in Philadelphia [4]), daß *Helix* und *Fossa helicis* am meisten auf tiefe Töne reagierten, *Anthelix* und *Fossa anthelicis* auf mittlere und die *Concha* auf hohe. Ich meine, daß es sich hierbei um accidentelle Verhältnisse handelt, denen keinerlei erhebliche physiologische Bedeutung zukommt. Wenn Burnett, wie es nach dem mir allein zugänglichen Referat seiner Arbeit scheint, diesen Dingen einen wesentlichen Einfluß auf die Klanganalyse zuschreibt, so ist das jedenfalls übertrieben.

Wichtiger ist, daß der Gehörgang bestimmte Töne durch Resonanz zu verstärken vermag. Bei der relativen Kürze desselben kommen natürlich nur höhere Töne in Betracht. Nach Rinne liegt der Eigenton des Gehörganges in der Gegend des f^4. Helmholtz fand für sein rechtes Ohr ebenfalls f^4, für das linke c^4; Hensen bei sich selbst rechts d^4, links a^4 und bei einer Frau rechts f^4, links g^4; Kiesselbach [5]) links a^4, rechts h^4. Durch Eintreiben von Luft in die Paukenhöhle oder auch durch Anspannung des Trommelfelles kann der Resonanzton um eine große Terz bis Sexte vertieft werden.

---

[1]) Wagners Handwörterbuch d. Physiol. **4**, 350, 1853. — [2]) Zeitschr. f. rationelle Medizin (3), **24**, 12, 1865. — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 123, 1882. — [4]) Referat seiner Publikation im Arch. f. Ohrenheilk. **9**, 127, 1875. — [5]) Pflügers Arch. **31**, 95 und 377.

c) Die Funktion des Mittelohres.

Die Physiologie des Mittelohres hat die Mechanik des Trommelfells und der Gehörknöchelchen, die Funktion der Binnenohrmuskeln und die Bedeutung der Paukenhöhle nebst Tube für das Hören zu behandeln.

Das Studium der Schallübertragung durch das Mittelohr bietet nicht geringe Schwierigkeiten, da es sich hier um Gebilde von recht kompliziertem Bau und um ganz eigenartige physikalische Verhältnisse handelt. Das meiste verdanken wir in bezug auf die Erkenntnis der Gehörknöchelchenmechanik Helmholtzens, Physik und Physiologie in gleichem Grade beherrschender, Genialität, während vor ihm und leider auch noch nach ihm [1]) über diesen Gegenstand manches Verwirrte und Verwirrende publiziert worden ist.

Während wir jetzt wissen, daß Trommelfell und Knöchelchenkette bei der Schallfortpflanzung aus der Luft auf das innere Ohr als Ganzes schwingen, daß der Steigbügel sich nach Art eines Stempels im ovalen Fenster hin und her bewegt und daß er die Labyrinthflüssigkeit gegen das ausweichende runde Fenster vor sich herschiebt, bzw. zurücksaugt, glaubten bis über die Mitte des vorigen Jahrhunderts hinaus maßgebende Physiologen und Ohrenärzte, wie Johannes Müller und Toynbee [2]), daß der Schall durch die Knöchelchenkette ebenso in Form von Verdichtungs- und Verdünnungswellen hindurchginge wie durch die übrigen Kopfknochen, und daß transversale Schwingungen des Trommelfelles allenfalls ausnahmsweise, etwa bei excessiver Stärke des Schalles, vorkamen. Hinsichtlich der Massenbewegung der Labyrinthlymphe erklärte Harless [3]) noch 1853 ausdrücklich, daß eine solche aller Wahrscheinlichkeit nach viel zu schwach oder zu langsam und nicht kongruent mit den Schallwellen sein würde. Unter den Physikern dagegen betrachteten schon Savart und Seebeck das Trommelfell als eine Membran, die wie andere in der Akustik verwendete Membranen transversaler Schwingungen fähig sei, und erörterten seine auffallende Eigenschaft, mit so vielen Tönen von verschiedener Höhe annähernd gleich gut mitschwingen zu können. Der erstere [4]) nahm an, der Eigenton des Trommelfells liege sehr hoch im Verhältnis zu allen überhaupt vernehmbaren Tönen, wodurch allerdings eine ziemlich gleichmäßige Horstärke für die tieferen Töne bedingt sein würde. Seebeck [5]) zeigte dann durch mathematisch-physikalische Deduktionen, daß Membranen, die wie das Trommelfell im Verhältnis zu ihrem Areal wenig Masse haben, geeignet sind, auch mit Tönen mitzuschwingen, die von dem Eigenton beträchtlich differieren, und daß die einseitige Belastung des Trommelfells durch die Kette der Gehörknöchelchen und das an diese direkt angrenzende Labyrinthwasser in demselben Sinne wirke, ja geradezu das Hauptmittel sei, durch welches das Ohr in den Stand gesetzt würde, eine so große Anzahl von Tonen mit ungefähr übereinstimmender Intensität auf-

---

[1]) Z. B. von G. Zimmermann, Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., Supplementbd. 1899 (u. a. a. O.; vgl. die letzten Bände d. Zeitschr. u. d. Arch. f. Ohrenheilk.); von Boenninghaus, Zoolog. Jahrbücher, Abteilung f. Anat. u. Ontogenie **19**, 1903 u. A. — [2]) Krankheiten des Gehörorgans, übersetzt von Moos, Heidelberg 1863. — [3]) Wagners Handwörterbuch d. Physiol. **4**, 384. — [4]) Ann. de chim. et phys. **26**, 24. — [5]) Pogg. Ann. **62**, 289 ff., 1844 u. **68**, 458 ff., 1846.

zunehmen. Während aber Seebeck sich auf Betrachtungen über das Trommelfell beschränkte, hat Ed. Weber [1]) wohl als erster die heute geltende Auffassung von der Mittelohrmechanik in ihren Grundzügen klar und vollständig ausgesprochen und nur darin einen abweichenden Standpunkt eingenommen, daß er Hammer und Amboß zusammen als einen festen Winkelhebel betrachtete; eine Ansicht, die schon Hermann Meyer in seinem Lehrbuch der physiologischen Anatomie [2]) richtig stellte, indem er die Gelenkverbindung zwischen dem Kopfe des Hammers und der Basis des Amboß als einen Ginglymus kennzeichnete und darauf hinwies, daß weder nach vorn noch nach hinten, wohl aber von außen nach innen gerichtete Bewegungen des Hammers den Amboß nach innen schöben. Dabei bewegen sich nach Meyer Hammer und Amboß als Ganzes um eine ungefähr horizontale Achse, die durch den *Processus folianus* und den kurzen Fortsatz des Amboß geht, und die Übertragung auf den Stapes geschieht, indem das *Ossiculum Sylvii* eine Bewegung nach oben macht, der Steigbügel selbst aber vermöge des Kugelgelenkes zwischen seinem Capitulum und dem Ossiculum und infolge seiner Anheftung an gewisse Schleimhautbänder eine gerade nach innen gerichtete. Auch Mach [3]) hat sich, wiederum an Seebecks Arbeiten anknüpfend, theoretisch-deduktiv mit der Mittelohrmechanik beschäftigt. Er prüfte genauer die Umstände, die unser Ohr befähigen, das Trommelfell treffende Töne von verschiedener Höhe mit gleichmäßiger Stärke aufzunehmen sowie auch einem raschen Wechsel der Tonhöhe zu folgen, und kam dabei zu dem Resultat, daß die Labyrinthflüssigkeit um so nachgiebiger den Schwingungen der Luft folgen müsse, je größer der Widerstand, je größer die Fläche des Trommelfells, je kleiner das ovale Fenster, je kleiner die Masse des ganzen Apparates und je beträchtlicher die Hebelwirkung sei.

Helmholtz hat in seiner berühmten Studie über die Mechanik der Gehörknöchelchen und des Trommelfells [4]) der Gestalt des letzteren besondere Beachtung geschenkt. Die Spannung desselben ist durch den Handgriff des Hammers bedingt, der es nach innen zieht und selbst in dieser Lage durch seine Bänder und den *Tensor tympani* erhalten wird. Wären die Radialfasern, aus denen die äußere Schicht der Propria des Trommelfells besteht, allein vorhanden, so würden sie sich zu geraden Linien strecken; durch die die innere Schicht des Trommelfells bildenden konzentrischen Ringfasern und deren Spannung bekommen sie indessen eine gekrümmte, gegen den Gehörgang konvexe Form, wenn auch die Wölbung nur ziemlich flach ist. Helmholtz hat zuerst die akustischen Wirkungen einer analog beschaffenen Membran untersucht, die er aus einem Stück Schweinsblase herstellte. Um möglichst ähnliche Verhältnisse, wie sie das Trommelfell darbietet, zu schaffen, wurde diese Membran über einen Glascylinder gespannt und auf ihren Nabel ein Stift aufgesetzt, dessen anderes Ende als Steg für eine Saite diente. Die Saite lief in einiger Entfernung von dem Cylinder noch über einen zweiten Steg und war an ihren Enden durch zwei Wirbel gespannt. Wurde sie mit dem Bogen angestrichen, so resonierte die Membran sehr laut, und zwar

---

[1]) Ber. d. Kgl. Sächs. Gesellsch. d. Wiss., math.-physikal. Kl., 1851, S. 29. — [2]) Leipzig 1856. — [3]) Ber. d. Wiener Akad., math.-physikal. Kl., **48** (2), 283, 1863. — [4]) Pflügers Arch. f. Physiol. **1**, 34 bis 43, 1869. (Wiss. Abhandl. **2**, 515.)

erstreckte sich die Resonanz, wie sich durch successive Verkürzung der Saite zeigen ließ, auf einen sehr großen Teil der Skala; namentlich waren die Töne aus der Mitte der viergestrichenen Oktave, wie beim Gehörgang, begünstigt. Die Übertragung von Tonschwingungen aus der Luft auf die Saite gelang gerade so gut. Mithin trägt die eigentümliche Form des Trommelfells offenbar ebenfalls zu dessen Befähigung, verschieden hohe Töne mit gleicher Stärke aus der Luft aufzunehmen, bei [1]).

Abgesehen hiervon aber ist die Gestalt des Trommelfells und überhaupt die Konstruktion der Knöchelchenkette zu dem mechanischen Effekt geeignet, die Bewegung von relativ großer Amplitude und geringer Kraft, mit welcher die schwingenden Luftteilchen das Trommelfell treffen, in eine solche von geringerer Amplitude und größerer Kraft zu verwandeln. Die größere Kraft ist nötig, um das im Verhältnis zur Luft dichte und schwere Labyrinthwasser schnell hin und her zu treiben, während die geringere Amplitude immer noch zu einer genügenden Bewegung der Nervenendigungen in der Schnecke ausreicht. Eine solche mechanische Aufgabe läßt sich in der Technik auf mancherlei Weise, durch Flaschenzüge, Krähne, Hebel usw. lösen. Die Art aber, wie dies in der Trommelhöhle geschieht, ist ganz eigentümlich. Eine regelrechte Hebelwirkung findet zwar auch statt, insofern eben Hammer- und Amboßstiel einen Winkelhebel darstellen und der vom Hammer gebildete Arm etwa anderthalbmal so lang ist als der andere, so daß der Druck auf den Steigbügel ungefähr anderthalbmal so groß sein wird als die Kraft, welche die Spitze des Hammerstieles einwärts treibt. Die Hauptverstärkung wird jedoch durch die flache Wölbung der Trommelfellfläche gegen den Gehörgang bedingt. Denn dadurch, daß die Radiärfasern die Form schwach gekrümmter Bögen haben, entsteht unter dem Druck einer Luftverdichtung im Gehörgang eine mechanische Wirkung, als ob der Luftdruck am Ende eines sehr langen Hebelarmes angriffe und die Spitze des Hammerstieles das Ende eines sehr kurzen Hebelarmes bildete. Mit anderen Worten, eine relativ bedeutende Verschiebung der Trommelfellfläche hat nur eine verhältnismäßig kleine Bewegung der Hammerspitze zur Folge; es findet also eine Reduktion der Elongationen statt, wofür in entsprechendem Maße Kraft gewonnen werden muß. Daß es sich in der Tat so verhält, hat Helmholtz nicht nur mathematisch bewiesen, sondern auch experimentell. Er füllte den Gehörgang eines anatomischen Präparates vollständig mit Wasser und setzte mittels einer passenden Vorrichtung ein Manometerröhrchen auf, das sehr genau die Verschiebungen des Trommelfelles anzeigte, wenn dieses zu Bewegungen veranlaßt wurde. Letzteres geschah in der Weise, daß die in einem, in den Vorhof des Labyrinthes eingefügten Röhrchen befindliche Flüssigkeit angesogen oder einwärts gedrückt wurde, wobei Zug und Druck sich durch die Knöchelchenkette auf das Trommelfell fortpflanzten. Die Exkursionen des Hammers wurden an den Bewegungen eines aufgekitteten Glasfadens gemessen, und es ergab sich aus der Vergleichung der Ausschläge des Hammers und des Trommelfelles, daß die mittlere Verschiebung dieser Membran etwa dreimal so groß war als die gleichzeitige Bewegung der Hammerstielspitze.

---

[1]) Vgl. die bestätigenden Versuche von Politzer, Archiv f. Ohrenheilk. 6, 36, 1874.

Im einzelnen ist über den Bewegungsmodus der Gehörknöchelchenkette bei der Übertragung von Tonschwingungen auf das innere Ohr nachstehendes zu sagen, allerdings mit der Einschränkung, daß kleine anatomische und physiologische individuelle Differenzen häufig sind. Das im ganzen sattelförmige Gelenk zwischen Hammer und Amboß ist nach Helmholtz in seiner Wirkung den Gelenken der bekannten mit Sperrzähnen versehenen Uhrschlüssel vergleichbar. Solche Sperrzähne hat das Hammer-Amboßgelenk namentlich an seiner unteren Seite, und zwar liegt der des Hammers außen, dem Trommelfell zugekehrt, der des Amboß innen, während umgekehrt gegen das obere Ende der Gelenkgrube hin der Amboß mehr nach außen, der Hammer nach innen übergreift. Infolge hiervon packt der Hammer, wenn sein Stiel einwärts schwingt, den Amboß ganz fest und nimmt ihn mit. Geht aber das Trommelfell mit dem Hammerstiel nach außen, so braucht der Amboß bei excessiver Elongation nicht zu folgen, da dann die Sperrzähne auseinanderweichen und die Gelenkflächen aneinander gleiten. Nach den Versuchen von Helmholtz ist die freie Exkursion, welche der Hammer mit dem Stiel nach außen machen kann, indem er sich gegen den Amboß im Gelenk verschiebt, mindestens neunmal so groß als die, welche er mit Amboß und Stapes zusammen auszuführen imstande ist. Die gemeinsame Drehung von Hammer und Amboß vollzieht sich um eine Achse, welche, wie Helmholtz in Übereinstimmung mit Politzer gefunden hat, eine gewisse Beweglichkeit besitzt. Beim Einwärtsschwingen des Hammergriffes wird der Hammerkopf durch den Amboß nach hinten gezogen, so daß der Stiel etwas nach vorwärts rückt. Dadurch wird eine Verschiebung des Trommelfellnabels nach hinten, die sich sonst aus der schrägen Richtung des Hammerachsenbandes gegen die Ansatzebene des Trommelfells ergeben würde, ausgeglichen. Anderseits wird eine Hebung des Nabels bei der Einwärtsbewegung des Hammerstieles durch eine ebenfalls vom Amboß bewirkte Senkung des ganzen Hammers kompensiert, so daß durch diese Einrichtungen die geradlinige Bewegung des Nabels nach innen garantiert wird. Bei der Übertragung der Einwärtsbewegung des Hammerstieles auf den Steigbügel kommt in Betracht, daß die Spitze des langen Amboßfortsatzes noch etwas mehr in die Höhe steigt, als durch die eben erwähnte Senkung des Hammers rückgängig gemacht wird. Dadurch wird auch, wie Helmholtz, Henke und andere Autoren im Gegensatz zu der vorhin angeführten Darstellung Hermann Meyers beobachtet haben, das Köpfchen des Steigbügels gehoben, so daß der obere Rand der Fußplatte beim Eindringen in den Vorhof weiter vorgeschoben wird als der untere. Zugleich rückt das *Ossiculum Sylvii* etwas nach vorn, weshalb auch das vordere Ende des Steigbügeltrittes ein wenig tiefer ins Labyrinth dringt als das hintere. Die Beweglichkeit der Stapesbasis ist übrigens gering. Die größten Werte, die Helmholtz für die Exkursionen derselben erhielt, betrugen nur $^1/_{14}$ bzw. $^1/_{18}$ mm.

Der Vorgang der Schallübertragung durch das Mittelohr ist also, mit wenig Worten nochmals beschrieben, der folgende. Das Trommelfell schwingt mit dem fortzuleitenden Tone oder Klange als resonierende Membran mit. Bei seiner Einwärtsbewegung geht die Hammergriffspitze mit nach innen und, da die Bewegung des Hammers im wesentlichen eine Drehung um das Achsenband ist, der Hammerkopf nach außen. Dabei nimmt letzterer den

Kopf des Amboß, der sich seinerseits um seinen kurzen Fortsatz als Achse dreht, mit und veranlaßt so eine Hebung und Einwärtsbewegung des langen Amboßfortsatzes, durch welche der Steigbügel in den Vorhof gedrückt wird. Beim Auswärtsschwingen des Trommelfells verlaufen die Bewegungen der Knöchelchen umgekehrt.

Daß die Knöchelchenkette samt dem Labyrinthwasser nicht nur bei gewaltsamen Druckveränderungen, sondern auch unter der Einwirkung von Tonwellen als Ganzes hin und her oszilliert und der Schall nicht etwa durch die unbewegliche Kette in Form von Molekularschwingungen zur Basilarmembran dringt, ergibt sich erstens als theoretisch notwendige Konsequenz aus dem Umstande, daß die Dimensionen der in Frage kommenden Teile des mittleren und inneren Ohres verschwindend gering gegen die Wellenlängen der Töne sind [1]), zum mindesten gegen die Wellenlängen der tieferen Töne. Je mehr die Tonhöhe steigt, um so weniger wird freilich diese Bedingung erfüllt, um so weniger sind wir aber auch anderseits auf die kraftvolle Übertragung der Schallschwingungen aus der Luft auf das innere Ohr seitens der Knöchelchenkette angewiesen. Denn mit zunehmender Schwingungszahl gehen die Tonwellen immer leichter unmittelbar von der Luft auf die Kopfknochen über, durch die sie dann direkt zum Labyrinth gelangen, und verliert, wie namentlich aus den reichen Erfahrungen Bezolds [2]) hervorgeht, die durch Funktionsstörungen im Mittelohr bedingte Schädigung des Gehörs für Luftleitung immer mehr an Bedeutung, weshalb Bezold es auch direkt ausspricht, „daß in der Aufnahme der tiefen Töne aus der Luft... die Haupt-, ja wahrscheinlich die einzige Funktion des Schallleitungsapparates besteht".

Zweitens lassen sich die Schwingungen der Gehörknöchelchenkette bei der Leitung von Tonwellen direkt beobachten. Versuche hierüber hat meines Wissens zuerst Politzer [3]) angestellt. An dem Kopfe einer möglichst frischen menschlichen Leiche wurde das *Tegmen tympani*, das Dach der Paukenhöhle, der einen Seite entfernt und auf der höchsten Spitze des freigelegten Hammers ein an seinem Ende mit einer Federfahne versehener dünner Glasfaden oder Strohhalm aufgekittet. Der Gehörgang des Präparates stand durch einen Schlauch mit einem Helmholtzschen Resonator in Verbindung, welcher auf eine in seiner Nähe aufgestellte Orgelpfeife abgestimmt war. Tönte die Pfeife, so geriet der Fühlhebel in Schwingungen, die mittels der Federfahne auf einen rotierenden berußten Cylinder aufgezeichnet werden konnten. Auf diese Weise gewann Politzer auch vom menschlichen Amboß und von der Columellaplatte [4]) einer Ente sehr klare Kurven, und zwar nicht nur von einfachen Tönen, sondern auch von Schwebungen und von einem aus Grundton und Oktave bestehenden Klange, aus deren Beschaffenheit zu entnehmen ist, daß die Gehörknöchelchenkette zusammengesetzte Tonbewegungen nach dem Superpositionsprinzip überträgt. Lucae [5]) erhielt die gleichen Resultate, indem er die Töne dem Trommelfelle nicht durch die Luft im äußeren Gehörgang, sondern auf dem Wege der Knochenleitung zuführte, womit zugleich der Beweis erbracht wurde, daß wir den Ton einer

[1]) Vgl. Helmholtz, Mechanik der Gehörknöchelchen, Pflügers Arch. **1**. — [2]) Münch. mediz. Wochenschr. **19** u. **20** (1900). — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 59, 1864. — [4]) Die Columella ist das Analogon der Gehörknöchelchenkette des Menschen. — [5]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 303, 1864.

auf unseren Kopf gesetzten Stimmgabel nicht allein durch direktes Übergehen der Wellen aus dem Knochen auf das Labyrinth, sondern auch durch Vermittelung des Paukenapparates hören. Politzer [1]) hat diesen Beweis noch durch folgendes Experiment gestützt. Das Labyrinth eines Präparates, dessen Amboß-Steigbügelgelenk getrennt war, wurde mit Luft gefüllt und durch den *Porus acusticus internus* auskultiert, während eine auf den Knochen gesetzte Gabel tönte; beim Abheben des Amboß vom Steigbügel wurde der Ton jedesmal schwächer, beim Wiederanlegen stärker.

Die Fühlhebel bilden indessen, wie Buck [2]) gezeigt hat, eine störende Belastung der Knöchelchen. Auf Anregung und unter Leitung von Helmholtz beobachtete daher dieser Autor die unter der Wirkung eines kräftigen, direkt in den Gehörgang dringenden Pfeifentones schwingenden Knöchelchen von oben her mikroskopisch und maß die Schwingungsamplituden einzelner Punkte ihrer Oberfläche, die, von einer hellen Lampe beleuchtet, entweder infolge ihrer Feuchtigkeit oder infolge Bestäubens mit Amylum hell glänzten. Auch das Mitschwingen des runden Fensters ließ sich auf diese Weise anschaulich machen. Erwähnenswert ist, daß die Exkursionen der Knöchelchen durch Zerstörung der *Fenestra rotunda* oder Durchschneidung der Tensor- und Stapediussehne nicht verändert wurden. Mikroskopische Beobachtungen der schwingenden Gehörknöchelchen sind später noch von Burnett [3]), von Politzer [4]) und von Mach in Gemeinschaft mit Kessel [5]) ausgeführt worden. Die zuletzt Genannten brachten eine stroboskopische Verlangsamung der Bewegungen zur Anwendung, was ein sehr genaues Studium der Details ermöglichte. So konnten sie sich durch diesen Kunstgriff davon überzeugen, daß das runde Fenster sich jedesmal nach außen wölbte, wenn der Steigbügel in den Vorhof eindrang. Wurden zu hohe Töne benutzt, so wurden die Elongationen zu klein, um sichtbar zu sein.

Mach und Kessel [6]) haben auch beim Lebenden die Schwingungen des mit Goldbronze bestäubten Trommelfells mittels einer sinnreichen Vorrichtung während der Zuleitung eines Tones durch den Gehörgang mikroskopisch beobachtet. Desgleichen experimentierte Berthold [7]) am lebenden Menschen. Das Prinzip der manometrischen Flamme benutzend, machte er den äußeren Gehörgang zur Gaskammer und erhielt im rotierenden Spiegel schöne Flammenkurven, wenn auf den Schädel eine tönende Gabel gesetzt wurde. Nagel und Samojlóff [8]) konnten dieses Resultat bestätigen. Sie stellten außerdem ähnliche Versuche an einem Tierkopfe an, wobei die Paukenhöhle als Gaskammer diente. Daß bei solchen Experimenten wirklich die Schwingungen des Trommelfelles es sind, die die Vibrationen der Flamme hervorrufen, folgt daraus, daß die letzteren aufhören oder geringer werden, wenn man die Trommelfellbewegungen während der Beobachtung durch geeignete Maßnahmen hindert oder erschwert. Die Autoren bekamen übrigens eine Reaktion des Trommelfelles nicht nur dann, wenn vor der in den Gehörgang des Präparates führenden Röhre mit gewöhnlicher Intensität gesungen, gesprochen

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 330, 1864. — [2]) Arch. f. Augen- und Ohrenheilkunde **1** (2), 121, 1870. — [3]) Ebenda, **2** (2), 64, 1872. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **6**, 41 f., 1873. — [5]) Ber. d. Kais. Akad. z. Wien, math.-physikal. Kl., **69** (3), 221 ff., 1874. — [6]) Ebenda **66** (3), 1872. — [7]) Monatsschr. f. Ohrenheilk. 1872 (3). — [8]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1898, S. 505.

oder gepfiffen wurde, in welchem Falle die Flamme sehr starke Schwingungen machte, sondern auch noch, wenn leise geflüstert ward. Schon damit erledigt sich ohne weiteres der von Zimmermann gegen die Massenschwingungen des Mittelohrapparates ins Feld geführte Einwand, daß dieselben nur bei übertrieben starker Schallerregung gleichsam als eine Art Kunstprodukt in die Erscheinung träten.

Wenn nun aber durch die Schwingungen der Gehörknöchelchenkette die Tonwellen der Luft in zwar kleinere, jedoch dafür kräftigere Oszillationen umgewandelt werden, so fragt es sich, ob und wodurch ein das Labyrinth schädigender Effekt allzu lauter Töne oder Geräusche verhütet werden kann. In dieser Beziehung machte Helmholtz darauf aufmerksam, daß unter dem Druck einer übermäßigen Luftverdichtung im Gehörgang das Trommelfell durchgebogen und dadurch der Hammerstiel wieder nach auswärts gezogen werden würde, falls die Membran nicht schon vorher platzen sollte. Einer excessiven Bewegung nach dem Gehörgang zu, welche die Folge einer hochgradigen Verdichtung der Paukenhöhlenluft oder Verdünnung der äußeren Luft sein könnte, widersteht anderseits das *Ligamentum externum* und das *Ligamentum superius mallei;* außerdem wirkt der Umstand, daß der Hammer mit dem Handgriff auswärts schwingen kann, ohne den Amboß mitzunehmen, in dem gleichen Sinne, und schließlich dürfte auch das Gelenk zwischen Amboß und Steigbügel noch eher zerreißen als das Ringband, mittels dessen die Stapesplatte im ovalen Fenster befestigt ist.

Als ein Schutzorgan des Ohres ist vielfach auch der *Tensor tympani* bezeichnet worden. Helmholtz betrachtete denselben als ein mäßig straffes, elastisches Band, dessen Spannung zeitweilig durch aktive Zusammenziehung beträchtlich erhöht werden könne und dessen Zweck hauptsächlich im Anspannen des Hammerachsenbandes bestehe, welches dadurch zugleich mit dem Stiele des Hammers und dem Trommelfelle nach innen gezogen werde. Das Resultat einer Tensorkontraktion würde hiernach das sein, daß erstens die Schwingungen der Knöchelchenkette verringert werden und zweitens in der Ruhe der Steigbügel weiter labyrinthwärts als gewöhnlich im ovalen Fenster steht. Die Dämpfung würde ihrerseits eine Schwächung namentlich der tieferen aus der Luft zum Ohre gelangenden Töne zur Folge haben müssen und die Einpressung des Steigbügels in den Vorhof eine Steigerung des Labyrinthdruckes. Daß es sich wirklich so verhält, ist durch zahlreiche Beobachtungen und Versuche[1]) an gesunden und kranken Menschen, an anatomischen Präparaten und an Modellen festgestellt.

Zunächst ist in dieser Beziehung zu erwähnen, daß die Durchschneidung der Tensorsehne bei Patienten eine Vergrößerung der Schwingungsweite des Mittelohrapparates hervorruft, die nach Bezold namentlich die Auswärtsbewegung betrifft. Kessel beobachtete im Anschluß an die Tenotomie gelegentlich eine mehrtägige Hyperästhesie gegenüber den höheren Tönen bei

[1]) Die seit 1864 erschienenen Publikationen über die normale und pathologische Funktion der Binnenohrmuskeln sind im Archiv für Ohrenheilkunde zum Teil als Originalartikel enthalten, zum anderen Teil referiert, so daß die Durchsicht dieser Zeitschrift dem Interessenten einen wohl als vollständig zu bezeichnenden Überblick über die einschlägige Literatur ergeben dürfte. Dasselbe gilt übrigens bezüglich der Tubenwirkung und der Druckverhältnisse in Pauke und Labyrinth.

normaler Hörschärfe. Was die Versuche an Gesunden anlangt, so handelt es sich dabei zumeist um Personen, die imstande sind, ihren Tensor willkürlich zu kontrahieren. Ich gehöre selbst zu denen, die diese Fähigkeit besitzen. Zum Zwecke der Tensorzusammenziehung hebe ich das Gaumensegel. Dabei entsteht in der Regel ein knackendes Geräusch in beiden Ohren, das von der Öffnung der Tuben herrührt. Neben diesem Knacken und noch deutlicher, wenn dasselbe einmal ausbleibt, habe ich eine sehr weiche, sehr kurz dauernde, flatternde Gehörsempfindung, die zweifellos von einer Mitbewegung des Trommelfells verursacht wird, da der Eindruck ganz derselbe ist wie derjenige, den das rasche Vorüberführen eines Fingers vor der Gehörgangsöffnung erzeugt. Während der Tensorkontraktion werden, wie ich, die Angaben verschiedener Autoren bestätigend, aussagen kann, aus der Luft zugeleitete tiefere und mittlere Töne merklich gedämpft. Am besten gelingt ein solcher Versuch, wenn der Ton ziemlich kräftig ist. Beobachtungen an Präparaten des Gehörorganes von Menschen und Tieren sind namentlich von Politzer[1]) und Lucae[2]) angestellt. Die Resultate derselben sind dahin zusammenzufassen: Wenn während der Zuleitung eines Tones durch den Gehörgang oder vom Knochen aus das Trommelfell durch Ziehen an einem an der Tensorsehne befestigten Faden oder durch elektrische Reizung der motorischen Nervenbahn des Tensors angespannt wird, so läßt sich beim Auskultieren der Paukenhöhle durch den Gehörgang oder durch die Tube eine Abschwächung des Grundtones neben einem Hervortreten der Obertöne konstatieren und zeigen anderseits irgendwo auf die Knöchelchenkette aufgesetzte Fühlhebel eine Verminderung der Exkursionen an. Die Versuche an Modellen haben im wesentlichen das Gleiche ergeben, sind aber natürlich weniger beweiskräftig.

Die Zahl derjenigen, deren Trommelfellspanner dem Willen unterworfen ist, scheint nur gering zu sein. Die Bewegungen dieses Muskels sind im allgemeinen reflektorische. Den sensiblen Teil der vor einigen Jahren von V. Hammerschlag[3]) genauer untersuchten Reflexbahn bildet der Acusticus, den motorischen der Trigeminus, wie zuerst von Politzer[4]) experimentell gezeigt wurde, der im Verlaufe seiner hierauf bezüglichen Untersuchung sich auch mittels verschiedener Methoden davon überzeugte, daß eine Tensorkontraktion den intralabyrinthären Druck steigert.

Demnach wäre die Schutzfunktion des Tensors so zu denken, daß der Muskel sich auf reflektorischem Wege unter der Einwirkung eines überlauten Schalles während der ganzen Dauer desselben, also unter Umständen tetanisch, zusammenzieht und damit die Schwingungen des Mittelohrapparates hemmt. Es soll nun gewiß nicht geleugnet werden, daß ein solcher Vorgang möglich ist. Aber anderseits muß auch als Einschränkung hervorgehoben werden, daß gerade die am leichtesten unerträglich werdenden hohen Töne durch die Paukenfellspannung wenig oder gar nicht gedämpft werden und daß das Ohr in jedem Falle während der, freilich ja nur kurzen, Reaktionszeit ungeschützt bleibt. Außerdem ist es noch nicht entschieden, ob überhaupt unter nor-

---

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 68 ff. u. 326, 1864. — [2]) Ebenda **1**, 311. — [3]) Ber. d. Wiener Akad., math.-naturw. Kl., **108** (3), 1899 u. Arch. f. Ohrenheilk. **47**, 251, 1899. — [4]) Ber. d. Wiener Akad., math.-naturw. Kl., **43** (2), 1861.

malen Verhältnissen tetanische Kontraktionen des Tensors vorkommen. Bockendahl[1]), ein Schüler Hensens, beobachtete zwar den Tetanus, befindet sich aber damit in direktem Gegensatz zu älteren Versuchen von Hensen selbst, in denen kein Tetanus erzeugt werden konnte. Auch Ostmann[2]), der bei Ohrenkranken durch intensive hohe Töne und unangenehm laute Geräusche ausgelöste reflektorische Trommelfelleinziehungen otoskopisch beobachtete[3]), spricht immer nur von „Zuckungen" des Tensors, und ich selbst muß sagen, daß ich bei plötzlich einsetzenden gellenden Geräuschen ein schwirrendes Gefühl in der Gegend des Trommelfells habe, das eher den Eindruck einer raschen Aufeinanderfolge mehrerer Zusammenziehungen als den einer Dauerkontraktion macht. Im übrigen ist gewiß bemerkenswert, daß es beim Menschen vorwiegend oder allein gerade die hohen, nicht dämpfbaren Töne zu sein scheinen, die den Tensor erregen. Somit ist die Schutzfunktion des Trommelfellspanners doch in mancher Beziehung recht fraglich.

Von verschiedenen Autoren ist denn auch dem Tensor eine andere Leistung zugeschrieben worden, nämlich eine Accommodation des Trommelfelles. Wiederholt und sehr eingehend hat sich Mach[4]) mit diesem Gegenstande beschäftigt. Er stellte die Hypothese auf, daß der Muskel durch seine veränderliche Spannung eine Verschiebung des Maximums der Mitschwingungsfähigkeit des Trommelfells von einer Tonhöhe zur anderen herbeiführe, daß jeder Tonhöhe ein bestimmter Kontraktionsgrad des Tensors entspräche und daß die Unterschiede der Spannungsempfindungen zur Erkennung der Tonhöhe verwertet würden. Er hat jedoch später selbst diese Idee wieder fallen gelassen, da es ihm auf keine Weise gelingen wollte, experimentelle Stützen für dieselbe zu gewinnen. Weder durch Auskultation noch durch Inspektion des Trommelfelles einer auf verschiedene Tonhöhen nacheinander horchenden Versuchsperson konnte irgend eine Veränderung der Paukenfellspannung wahrgenommen werden. Auch Schapringer[5]), der die bei willkürlicher Zusammenziehung seines Tensors erfolgende Einwärtsbewegung des Trommelfelles mittels eines in den Gehörgang eingesetzten Manometers demonstrieren konnte, vermochte keinerlei Accommodationsvorgänge zu konstatieren, und ebensowenig ist dies trotz vieler Bemühungen W. Heinrich[6]) am lebenden Menschen gelungen. Hensen[7]) hat, gestützt auf Beobachtungen an curarisierten Tieren, die Meinung vertreten, der Tensor zucke zu Anfang jedes Schalleindruckes und dämpfe beim Sprechenhören die Konsonanten zugunsten der Perzeption der wichtigeren Vokale. Seine Angabe, daß der Tensor des Hundes auf Schall reagiere, und zwar auf hohe Töne stärker als auf tiefe, ist durch die schon erwähnte Arbeit von Bockendahl bestätigt worden, desgleichen von Pollak[8]). Aber eine eigentliche Accommodation des

[1]) Üb. d. Beweg. d. M. tensor tympani usw., Kieler Diss., 1880, S. 16. — [2]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1898, S. 75 ff. — [3]) Daß die durch den Tensor bewirkte Trommelfellanspannung beim Lebenden sichtbar sein kann, war übrigens schon vorher bekannt. — [4]) Ber. d. Wiener Akad., math.-naturw. Kl., **48** (2), 1863; **50** (2), 1864; **51** (2), 1865; (mit Kessel) **66** (3), 1872. — [5]) Ebenda, **62** (2), 1870. — [6]) Zentralbl. f. Physiol., 1896 (7). Heinrichs neueste Versuche am Tierpräparat (Bull. de l'Acad. d. sciences de Cracovie, Cl. math. et nat., 1903) beweisen zum mindesten nichts für den Menschen. — [7]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1878, S. 312. Siehe auch Pflügers Arch. **87**, 355, 1901. — [8]) Med. Jahrbücher 1886, S. 555 ff. Vgl. auch Hammerschlag, Arch. f. Ohrenheilk. **46**, 1, 1899.

Trommelfelles scheint mir durch diese Versuche keineswegs bewiesen. Ich finde vielmehr, daß dieselbe um so unwahrscheinlicher wird, je genauer man alle dabei in Betracht kommenden Punkte durchdenkt.

Alles in allem genommen hat sich also bis jetzt eine bestimmte Tensorfunktion nicht feststellen lassen, und ähnlich verhält es sich mit dem *Musculus stapedius*. Derselbe wird vom Facialis innerviert und gelegentlich bei der Tätigkeit anderer von dem gleichen Nerven versorgter Muskeln mit kontrahiert. So bemerkte Gottstein[1]) an sich selbst beim Lauschen ein eigentümliches Spannungsgefühl im Ohre, das er auf den Stapedius bezog. In neuerer Zeit hat wiederum Ostmann[2]) darauf hingewiesen, daß der Stapedius besonders dazu geeignet scheine, beim Horchen in Aktion zu treten. Einerseits sei es wahrscheinlich, weil dabei ohnehin verschiedene vom Facialis abhängige Muskeln kontrahiert würden; anderseits müsse eine Innervation des Steigbügelmuskels die Schallwahrnehmung günstig beeinflussen, was ja beim Lauschen erstrebt werde. In der Tat macht der Steigbügel nach den Angaben von Politzer[3]), von Eysell[4]), von Mach und Kessel[5]) infolge einer Verkürzung des Stapedius mit dem vorderen Teile seiner Fußplatte eine nach der Pauke gerichtete Bewegung, so daß unter gleichzeitiger Verminderung des Labyrinthdruckes der stumpfe Winkel zwischen Incus und Stapes gestreckter wird, die Knöchelchenkette auswärts rückt und das Trommelfell sich ein wenig entspannt, wodurch nach den Ausführungen von Helmholtz u. a. die Mitschwingungen des Mittelohrapparates vergrößert werden. Indessen erheben sich doch auch Bedenken gegen die Ansicht Ostmanns. Beim anhaltenden Lauschen auf einen sehr leisen kontinuierlichen Schalleindruck müßte der Stapedius tetanisch kontrahiert sein, und dadurch würde, abgesehen von dem störenden Muskelton, wieder eine Schwächung des Gehörs eintreten. Denn der Muskel zieht das Köpfchen des Steigbügels, das bei den Inkursionen der Kette nach vorn und oben geht, nach der entgegengesetzten Richtung. Er wirkt daher bei der Dauerkontraktion offenbar hemmend auf die Schwingungen der Knöchelchen, und zwar in einer Weise, die ihn als Antagonisten des Tensors erscheinen läßt, insofern er vorwiegend die Einwärtsbewegungen hindert, während jener mehr die Exkursionen verringert.

Politzer hat das Verdienst, auf den Antagonismus zwischen Tensor und Stapedius besonders aufmerksam gemacht zu haben. Er[6]) hat auch die Meinung ausgesprochen, daß die wichtigste Funktion der beiden Muskeln darin bestehe, die durch die Luftdruckschwankungen bedingten Änderungen in der Spannung der Gehörknöchelchen und des Labyrinthinhaltes zu beseitigen, also den Spannungsgrad des Gehörapparates zu regulieren. Diese Ansicht ist freilich durchaus nicht ganz von der Hand zu weisen. Das Hauptmittel zum Ausgleich von Störungen und namentlich von anhaltenderen Störungen des Labyrinthdruckes ist aber wohl in den Zirkulationsverhältnissen im inneren Ohre zu suchen, während anderseits Unterschiede des Luftdruckes im Gehörgange und in der Pauke in erster Linie durch die von Zeit zu Zeit erfolgende Öffnung der Tube redressiert werden dürften.

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **16**, 60. — [2]) Arch. f. Anat. u. Physiol., physiol. Abteil., 1899, S. 546. — [3]) Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **43** (2), 431, 1861 u. Arch. f. Ohrenheilk. **9**, 162 f., 1875. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **5**, 245 ff., 1870. — [5]) Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **69** (2), 221 ff., 1874. — [6]) Arch. f. Ohrenheilk. **4**, 23, 1869.

Die meisten maßgebenden Autoren stimmen darin überein, daß die Eustachische Röhre nicht fortwährend offen ist und also keine ständige Ausgleichung des Luftdruckes innerhalb und außerhalb der Trommelhöhle stattfindet, sondern daß die Wandungen der Ohrtrompete in der Ruhe aneinander liegen und die Eröffnung[1]) nur bei gewissen Muskelaktionen, besonders bei der Schlingbewegung eintritt. Freilich ist der normale Tubenverschluß offenbar bei verschiedenen Personen verschieden kräftig. Damit erklären sich unter anderem die gelegentlich von Ohrenärzten beobachteten respiratorischen Trommelfellbewegungen, die auf eine Durchgängigkeit der Tube für den Respirationsstrom schließen lassen, wenn man sie nicht mit Lucae[2]) auf Druckschwankungen der Paukenluft infolge von Gaumensegelbewegungen zurückführen will. Die Regel ist aber jedenfalls, daß die Tube dem Durchtritt der Luft einen mehr oder weniger beträchtlichen Widerstand entgegensetzt. Wie oft festgestellt ist, tritt beim Besteigen höherer Berge in der verdünnten Atmosphäre ein eigentümliches, auf dem Überdruck der Trommelhöhlenluft beruhendes Gefühl von Spannung im Ohre ein, das beim Schlucken sofort zu weichen pflegt. Anderseits wird beim Aufenthalt in stark komprimierter Luft[3]) das Trommelfell nach innen gedrückt, so daß Rötung und Schmerzen neben der Empfindung der Völle auftreten. Auch hier erfolgt der Ausgleich durch eine die Tube eröffnende Schlingbewegung, wenn nicht gar das gewaltsame Einpressen von Luft durch forcierte Exspiration bei geschlossenem Munde und zugehaltener Nase nötig wird. Letzteres Experiment, bekannt unter dem Namen des Valsalvaschen Versuches, liefert übrigens, unter gewöhnlichen Verhältnissen ausgeführt, schon an sich den Beweis, daß in den meisten Fällen eine gewisse Kraft nötig ist, um den Tubenverschluß von außen zu sprengen, ebenso wie das umgekehrte, auch der negative Valsalvasche Versuch genannte, Experiment, das darin besteht, daß während des Zuhaltens von Mund und Nase tief inspiriert wird, und das eine Luftverdünnung in der Pauke mit Einziehung des Trommelfelles zur Folge hat[4]). Bei diesem Experiment dringt nach Politzer[5]) gewöhnlich erst infolge einer Schluckbewegung wieder Luft in die Pauke, während der Überdruck beim positiven Valsalvaversuch sich von selbst ausgleichen kann[6]).

Mach und Kessel[7]) konstatierten im pneumatischen Kabinett, daß das Trommelfell auf positive und negative Druckschwankungen mit entsprechenden Ein- und Auswärtsbewegungen reagierte, und folgerten auch ihrerseits hieraus, daß die Tuben in der Regel geschlossen seien. Der akustische Nutzeffekt dieser Einrichtung zeigt sich, wie die beiden Autoren mit Recht hervorheben, darin, daß die Schallintensität eine größere ist. Bei den tieferen Tönen ist der ganze Kopf gleichsam in die Schallwelle getaucht, und alle Teile des Ohres

[1]) Über den Mechanismus derselben vgl. den Abschnitt „Anatomische Vorbemerkungen". — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 96, 1864. — [3]) Vgl. Magnus, Ebenda **1**, 269, 1864. — [4]) Statt der Inspiration kann man auch den Schlingakt benutzen (sog. Toynbeescher Versuch). — [5]) Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **43** (2), 434, 1861. — [6]) Vgl. Hartmann (Experimentelle Studien über die Funktion der Eustachischen Röhre, Leipzig, Veit & Co., 1879, S. 11), nach dessen Beobachtungen im pneumatischen Kabinett die Tuben in der Ruhestellung ihrer Muskulatur sich wie Klappen verhalten, die nach dem Nasenrachenraum sich auf Druck in der Pauke öffnen, bei erhöhtem Druck im Nasen-Rachenraum aber geschlossen bleiben. — [7]) Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **66** (3), 1872.

befinden sich fast in derselben Druckphase. Würden nun die Tuben offene Röhren sein, so würde das Trommelfell gleichzeitig auf beiden Seiten von einer Verdichtung bzw. Verdünnung getroffen werden und daher nicht hinreichend ausgiebig schwingen können. Mach und Kessel ahmten dieses Verhältnis in der Art nach, daß sie einen Ton durch einen gegabelten Schlauch zugleich in den Gehörgang und in die Pauke leiteten. Die Knöchelchenkette blieb dabei, wie die mikroskopische Betrachtung ergab, in Ruhe, geriet aber in starke Schwingungen, sobald ein Arm des Schlauches abgeklemmt ward. Für die möglichst große Ausnutzung der Schallstärke ist demnach eine möglichst einseitige Zuleitung zum Trommelfell erforderlich und der Verschluß der Tuben sehr nützlich. Immerhin darf aber dieser Verschluß kein dauernder sein, denn sonst würde die Luft in der Pauke allmählich verschwinden, das Trommelfell samt der Knöchelchenkette durch den äußeren Luftdruck labyrinthwärts gepreßt und die Schwingungsfähigkeit entsprechend reduziert werden.

Bau und Form der Pauke sind also, wie man sieht, akustisch durchaus zweckmäßig. Hinter dem Trommelfell befindet sich eine mit Luft gefüllte Höhle, deren Größe genügt, um der Membran bei ihren Schwingungen keine Widerstände zu bieten, und die dabei doch nicht so geräumig und glattwandig ist, daß sie durch Resonanz schädlich wirken könnte. Diese Höhle ist für gewöhnlich geschlossen, so daß keine störenden Schallwellen in sie hineinzudringen vermögen; sie läßt sich aber von Zeit zu Zeit durch den Schluckakt öffnen und somit ventilieren.

Von mehreren Autoren wird angegeben, daß ein in die Nase geleiteter oder durch die eigene Stimme erzeugter Ton bei der Öffnung der Tuben durch eine Schlingbewegung oder durch den Valsalvaschen Versuch verstärkt gehört werde. Stehen die Tuben infolge von Muskelkontraktionen oder anderen pathologischen Zuständen anhaltend offen oder hindert man den Verschluß durch Einführung eines Katheters [1]), so tritt Tympanophonie (Autophonie) ein. Die Patienten haben die Empfindung, als ob ihre Stimme statt aus dem Munde direkt von innen ins Ohr dringe; die Stimme klingt dabei peinlich schmetternd und abnorm laut; auch wird die Atmung zuweilen als lästiges Rauschen gehört. Zum Glück pflegt die Autophonie meist nur anfallsweise aufzutreten und sich durch geeignete Maßregeln für kürzere oder längere Zeit beseitigen bzw. dauernd heilen zu lassen.

Daß die Tube nicht etwa normalerweise zur Wahrnehmung der Stimme dient, wie früher von einigen behauptet worden ist, geht schon aus der alten, von Joh. Müller auf Schellhammer zurückgeführten Erfahrung hervor, daß eine in den Mund geführte tönende Stimmgabel nicht gehört wird. Wenn Schwerhörige es für die Verbesserung der Schallperzeption nützlich finden, den Mund zu öffnen, so ist als Erklärung dafür wohl in erster Linie die Sistierung der Atmungsgeräusche heranzuziehen.

Die Einwärtspressung der Gehörknöchelchenkette durch eine Luftverdichtung im äußeren Gehörgang schwächt die aus der Luft zugeleiteten Töne, namentlich die tiefen, trotzdem an sich Preßluft den Schall besser leitet als gewöhnliche. Hiervon hat man sich schon vor längerer Zeit wieder-

[1]) Poorten, Monatsschr. f. Ohrenheilk. 1874, S. 27.

holt in Taucherglocken überzeugt. Derselbe Effekt läßt sich in sehr einfacher Form erzielen, wenn man einen Gummiballon durch einen Schlauch mit dem Ohre luftdicht verbindet und, während eine tönende Gabel auf den Schlauch gesetzt wird, den Ballon komprimiert. Diese Versuchsanordnung ist von Gellé in die otiatrische Diagnostik eingeführt worden[1]). Kessel[2]) konnte durch ein ganz ähnliches Verfahren die tiefen Töne bis in die große Oktave hinein und die Töne sehr hoher Klangstäbe völlig auslöschen; bei einer Druckverminderung im Gehörgang fand er die tiefen Töne bis c^4 geschwächt, die höheren von c^4 aufwärts aber verstärkt. Daß auch die Anspannung des Trommelfells beim negativen Valsalvaschen Versuch gegen tiefere Töne schwerhörig macht, ist schon von Wollaston[3]) beobachtet worden. Politzer[4]) erhielt das gleiche Resultat beim positiven Valsalvaexperiment und konstatierte mittels der Fühlhebelmethode, daß bei demselben eine Verringerung der Gehörknöchelchenschwingungen eintritt; nur im ersten Moment findet, entsprechend der anfänglichen Entspannung des Paukenfells, eine merkliche Vergrößerung der Exkursionen statt.

Eine Luftverdichtung im äußeren Gehörgang ist notwendig mit einer Erhöhung des Labyrinthdruckes verbunden. Beim negativen Valsalvaversuch jedoch wird zwar auch der Steigbügel ins Labyrinth gedrückt, dafür aber anderseits das runde Fenster entlastet. Wie Bezold[5]) fand, überwiegt hierbei der letztere Faktor. Beim positiven Valsalvaversuch erfahren ovales und rundes Fenster einen labyrinthwärts, das Paukenfell einen nach außen gerichteten Druck, und letzterer setzt sich wieder auf den Steigbügel als Zug fort, soweit nicht etwa die Fähigkeit des Hammers, mit dem Trommelfell ohne Mitnahme von Amboß und Stapes auswärts zu gehen, in Betracht zu ziehen ist; nach den Untersuchungen von Bezold und seinen Vorgängern gleichen sich in der Regel diese einzelnen Wirkungen so untereinander aus, daß eine Druckzunahme[6]) im Labyrinth resultiert.

d) Die Funktion der Schnecke. Die wichtigeren Hörtheorien.

Die Umsetzung der physikalischen Schallbewegung in den physiologischen Prozeß der Nervenerregung geschieht in der Schnecke, indem die Massenbewegungen des Labyrinthwassers auf das Cortische Organ und damit auf die Endausbreitung des Acusticus übertragen werden. Für die Schwingungen der Labyrinthlymphe sind unter normalen Verhältnissen lediglich die Bewegungen des Steigbügels maßgebend. Es werden zwar auch durch die Oszillationen des Trommelfelles in der Paukenhöhlenluft Verdichtungen und Verdünnungen erzeugt, und diese treffen das runde Fenster, aber die Schallwellen, welche durch letzteres ins Labyrinth gelangen könnten, werden im gesunden

---

[1]) Näheres hierüber s. unter anderem bei E. Bloch, Zeitschr. f. Ohrenheilk. **25**, 113 ff., 1894. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 145 f., 1882. — [3]) Philos. Transact. 1820. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **1**, 71, 1864. — [5]) Ebenda, **16**, 1 ff., 1880. — [6]) Abnorme Druckverhältnisse im inneren Ohre werden immer nach kürzerer oder längerer Zeit teils durch Regulierung seitens der Gefäße, teils durch den *Aquaeductus cochleae*, einen engen Gang in der *Scala tympani* dicht vor dem runden Fenster, der eine Kommunikation zwischen der *Scala tympani* und dem Subarachnoidealraum herstellt, beseitigt werden.

Ohre von der bedeutend größeren Kraft der Steigbügelbewegungen unwirksam gemacht [1]).

Was die Art der Erregung des Hörnerven durch die Schwingungen des Cortischen Organes betrifft, so wird man sich vorzustellen haben, daß die Härchen der Hörzellen hierbei eine vermittelnde Rolle spielen. Helmholtz und Hensen haben die Vermutung ausgesprochen, die Härchen stießen bei den Vibrationen der Basilarmembran gegen die Deckmembran, und eben dieses Anstoßen gäbe den eigentlichen Nervenreiz ab. Da es aber aus anatomischen Gründen und auch wohl physikalisch wahrscheinlicher ist, daß die Cortische Membran mit den darunter gelegenen Teilen immer gleichzeitig und gleichsinnig schwingt, so dürfte die neuerdings von E. ter Kuile [2]) geäußerte Ansicht der Wahrheit noch näher kommen. Danach können die inneren Cortischen Pfeiler an den Bewegungen der Basilarmembran so gut wie gar nicht teilnehmen, wohl aber tun dies die äußeren Pfeiler. Es findet also eine Rotation der Cortischen Bögen um den Fuß des inneren Pfeilers als Zentrum statt, womit ein seitliches Hin- und Hergleiten der Cortischen Membran auf deren Unterlage und entsprechende Beugungen der Härchen verknüpft sind, welche ihrerseits als Reiz auf die Nerven wirken.

Eine weitere Frage ist die nach dem Modus der Schallübertragung auf das Cortische Organ. Sie ist von besonderer Wichtigkeit und sozusagen der Angelpunkt aller Theorien des Hörens.

Es wäre an sich denkbar, daß die Labyrinthflüssigkeit, vor dem Druck des Steigbügels ausweichend, von der Vorhofstreppe durch das Helicotrema in die Paukentreppe hinüberflösse und umgekehrt bei einer Luftverdünnung im Gehörgang. Aber hierzu würde während der raschen Schallschwingungen keine Zeit sein und es ist viel wahrscheinlicher, daß die membranöse Scheidewand der Schnecke beim Eindringen des Steigbügels gegen die *Scala tympani* hingedrängt wird. Ihre Ausbuchtung könnte dabei ein längeres oder kürzeres Stück der Basilarmembran vom unteren Ende an betreffen oder auch an verschiedenen und mit der Art der erregenden Klangwelle wechselnden Stellen stattfinden.

Die letztere Annahme vertritt die Helmholtzsche Theorie, die auch unter dem Namen Resonanzhypothese bekannt ist, da ihr zufolge die Basilarmembran ein System von Saiten darstellt, deren jede auf einen bestimmten Ton abgestimmt ist und in Mitschwingungen gerät, wenn dieser Ton das Ohr trifft. Ähnliche Gedanken sind freilich schon öfter und lange vor Helmholtz ausgesprochen worden. Bereits Cotugno [3]) — um nur einen Namen zu nennen — meinte, die Schnecke sei mit einer Laute zu vergleichen, indem die hohen Töne mit der Basis, die tiefen mit der Kuppe perzipiert würden. Aber Helmholtz hat das Verdienst, die Hypothese am prägnantesten zum Ausdruck gebracht und wissenschaftlich am besten gestützt zu haben.

---

[1]) Bei Verknöcherung des ovalen Fensters kann das Hörvermögen teilweise erhalten sein. Inwiefern das runde Fenster in solchen Fällen an der Schallbewegung im Labyrinth beteiligt ist, ist noch durchaus nicht klargestellt. Vgl. die Übersicht über die einschlägige Literatur in der Dissertation von A. Frutiger, Über d. funkt. Bedeutung d. *Fenestra rotunda*, Wiesbaden, Bergmann, 1900. — [2]) Pflügers Arch. **79**, 146, 1900. — [3]) De aquaeductibus auris humanae internae; Anatomica dissertatio, Neapel 1760.

Daß die *Membrana basilaris* sich annähernd so verhalte, als wären ihre Radialfasern eine Reihe von nebeneinander liegenden gespannten Saiten, deren membranöse Querverbindung nur dazu diene, dem Drucke der Flüssigkeit eine Handhabe zu geben, leitete er mit Hilfe einer mathematischen Deduktion[1]) aus dem Umstande ab, daß die Grundmembran nicht nach allen Richtungen hin homogen beschaffen ist, sondern in der Längsrichtung leicht zerreißt, während die radialen Fasern einen ziemlich hohen Grad von Festigkeit haben.

Sollen nun diese Fasern nach Analogie der Klaviersaiten so abgestimmt sein, daß ihre Eigentöne eine regelmäßige Stufenfolge durch die ganze musikalische Skala bilden, so müssen für die tieferen Töne längere, für die hohen Töne kürzere Fasern vorhanden sein. In der Tat ist die Breite der Basilarmembran, also die Länge der Radialfasern, verschieden. An ihrem Anfange, dem ovalen Fenster gegenüber, ist die Membran relativ schmal. Die Breite beträgt hier nach Hensen beim Neugeborenen in 0,2625 mm Entfernung von der Wurzel 0,04125 mm und wächst bis zum Hamulus auf mehr als das Zwölffache, nämlich 0,495 mm. Es würden demnach der Helmholtzschen Theorie gemäß die höchsten Töne in der Nähe des Steigbügels, die tiefsten in der Schneckenkuppel ihren Angriffspunkt im Cortischen Organe finden.

Indessen ist die außerordentliche absolute Kürze der Fasern ein bedenklicher Punkt. Helmholtz hat zwar, um die Reaktion so kleiner Gebilde auf tiefe und tiefste Töne zu erklären, darauf hingewiesen, daß die Basilarmembran mit allerlei festen Massen, insbesondere mit dem Wasser der beiden Schneckentreppen beschwert sei, und wirklich werden ja auch schwingende Gabeln und Saiten, unter Wasser oder in eine andere Flüssigkeit gebracht, um mehrere Tonstufen bis zu einer Oktave vertieft, aber es ist zum mindesten noch unbewiesen, daß Saiten, deren Längen nur Bruchteile eines Millimeters betragen, durch irgend eine Belastung auf so tiefe Töne, wie wir sie noch zu hören vermögen, abgestimmt werden können. Hensen[2]) beobachtete, während er den Schall eines Klapphorns durch einen dem Trommelfell und den Gehörknöchelchen nachgebildeten Apparat in das Wasser eines Kastens leitete, in welchem ein Exemplar von *Mysis* befestigt war, daß einzelne der sog. Hörhaare am Schwanze dieses Tieres durch gewisse Töne des Horns zum Mitschwingen gebracht wurden. Ähnliche Resultate erhielt Alfred M. Mayer[3]) bei Versuchen, die die Fühler von *Culex Mosquito* betrafen. Aber aus dem Verhalten solcher haarartigen Organe lassen sich keine zwingenden Schlüsse auf dasjenige der Basilarmembran ziehen, zumal es durchaus fraglich ist, ob die Vibrationen der erwähnten Haare irgend etwas mit Schallempfindung zu tun haben.

Munk[4]) und Baginsky[5]) entfernten beim Hunde Teile der einen Schnecke, während die der anderen Seite völlig zerstört wurde. Die Hörprüfungen ließen sich zugunsten der Resonanzhypothese dahin deuten, daß die Exstirpation der Schneckenspitze Taubheit für tiefe Töne, die Verletzung der Basis Taubheit für hohe zur Folge habe. Gegen diese Versuche könnte

[1]) Lehre v. d. Tonempf. (5), Beilage 11. — [2]) Zeitschr. f. wiss. Zool. **13** (1863) u. Hermanns Handbuch der Physiologie **3** (2), 99 ff. u. 107 ff., 1880. — [3]) Amer. Journ. of Science and Arts **8**, Aug. 1874. — [4]) Monatsber. d. Berl. Akad., Mai 1881. — [5]) Virchows Arch. **94**, 65 ff., 1883.

man freilich verschiedene Einwände erheben, doch sind sie immerhin noch erheblich zuverlässiger als die gleichartigen Experimente an Meerschweinchen von Stepanow[1]), der sich gegen, und Corradi[2]), der sich wieder für die Helmholtzsche Theorie entschied.

Auch pathologisch-anatomische Befunde sind mehrfach zur Entscheidung über die Resonanzhypothese herangezogen worden. So fanden Moos und Steinbrügge[3]) bei der Sektion eines Patienten, der an Taubheit für hohe Töne gelitten hatte, eine Atrophie der Nervenäste der ersten Windung vor. Andere, darunter wieder Stepanow, zweifeln auf Grund ihrer Beobachtungen über Ausstoßung von Schneckenteilen an der Richtigkeit der Helmholtzschen Theorie; doch ist es fraglich, ob diese Fälle immer mit der namentlich in bezug auf die Miterregung des zweiten Ohres durch die Kopfknochenleitung nötigen Vorsicht beurteilt worden sind.

Was die Zahl der Radiärfasern in der Grundmembran anlangt, so ist sie als genügend groß für die Menge der verschieden hohen hörbaren Töne anzusehen. Sie ist beim Menschen von Retzius auf 24000, von Hensen auf 13400 geschätzt worden. Zwar würde das nach Maßgabe der Unterschiedsempfindlichkeit in der mittleren Tonregion nicht ganz ausreichen, um für jede einzelne unterscheidbare Tonhöhe eine besondere Faser verfügbar zu machen, aber es ist auch zu bedenken, daß die Unterschiedsempfindlichkeit nach den Enden der Skala, zumal nach den oberen hin sehr viel geringer ist.

Der Kernpunkt der Helmholtzschen Theorie ist also der, daß jeder einfache Ton von bestimmter Höhe nur eine ganz bestimmte Partie der Basilarmembran in Mitschwingungen versetzt und nur von den mit ihr in Verbindung stehenden Nervenfasern als Reiz aufgenommen wird. Wird ein zusammengesetzter Klang oder ein Akkord dem Ohre zugeleitet, so werden diejenigen elastischen Gebilde sämtlich erregt, deren Abstimmung den einzelnen Teiltönen entspricht, und bei genügender Aufmerksamkeit werden alle so entstehenden einzelnen Empfindungen nebeneinander wahrgenommen werden können. So erklart die Resonanzhypothese die wichtige und bedeutungsvolle Befähigung unseres Ohres zur Klanganalyse in ebenso einfacher wie eleganter Weise, und dies darf als ihr Hauptvorzug betrachtet werden. Außerdem hat die Helmholtzsche Begründung der physiologischen Klangzerlegung den Vorteil, mit noch einigen anderen physiologischen und pathologischen Beobachtungstatsachen bestens im Einklang zu stehen.

Ich möchte in dieser Beziehung zunächst auf gewisse neuere Versuche von Exner und Pollak[4]) hinweisen. Diese Autoren gingen davon aus, daß, falls das Hören durch Resonatoren vermittelt wird, eine in dem Sinuswellenzuge eines einfachen Tones periodisch wiederkehrende Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge eine schwebungsartige Empfindung erzeugen und daß die Intensität eines derartigen Gehöreindruckes mit der Häufung der Verschiebungen mehr und mehr bis zur schließlichen Unmerklichkeit sinken müsse. Beide Annahmen wurden durch die sorgfältigen Experimente als richtig erwiesen. Auch Hensen[5]) hat kürzlich dem Sinne nach ähnliche, in der Form

[1]) Monatsschr. f. Ohrenheilk. 1888 (4). — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **32** (1891). — [3]) Zeitschr. f. Ohrenheilk. **10**, 1, 1880. — [4]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **32**, 305 ff., 1903. — [5]) Ber. d. Berl. Akad. d. Wissensch., Gesamtsitz. v. 24. Juli 1902.

allerdings von den eben erwähnten abweichende Versuche publiziert, die zu der Resonanzhypothese passen. Ferner ist hier an die mannigfachen, vorwiegend Taubstumme betreffenden, otiatrischen Beobachtungen über sogenannte Tonlücken und Toninseln zu erinnern. Wie aus der Bezeichnung hervorgeht, handelt es sich dabei um Patienten, welche bestimmte einzelne Töne oder Gruppen benachbarter Töne nicht hören, während die Perzeption für die übrigen Teile der Skala erhalten ist. Daß in dieser Weise scharf begrenzte Stücke der Tonreihe einfach ausfallen und anderseits Hörreste gleichsam wie Inseln zwischen solchen Tonlücken stehen bleiben, ist nach der Helmholtzschen Hypothese, etwa unter der Annahme circumscripter Funktionsstörungen in dem Cortischen Organe, leicht verständlich, gar nicht dagegen nach der Mehrzahl der anderen bisher bekannt gewordenen Hörtheorien, sofern dieselben nicht bloße Modifikationen der ersteren sind[1]). Das gleiche gilt von vielen Fällen subjektiver Töne[2]) und von jenen pathologischen Vorkommnissen, die unter dem Namen *Diplacusis binauralis dysharmonica* bekannt sind. Die letztere Affektion besteht darin, daß die Patienten auf dem erkrankten Ohre einzelne Töne bzw. einen kleineren oder größeren Abschnitt der musikalischen Skala falsch, nämlich höher oder tiefer als auf dem gesunden Ohre hören, so daß unter Umständen abscheuliche Dissonanzen zustande kommen. Dieses Doppelthören kann nach Jacobson[3]), dem ich hierin beipflichten möchte, seine Ursache nur in pathologischen Prozessen innerhalb des Labyrinthes haben und dürfte am einfachsten im Sinne der Helmholtzschen Theorie nach Art des folgenden schematischen Beispiels zu erklären sein. Angenommen, in dem linken Cortischen Organe sei die auf c^0 abgestimmte Faser durch Schwellung so verlangert, daß sie nunmehr auf H mitschwingt. Dann wird links ein Ton von der Schwingungszahl des H auch die c^0-Faser und deren Nerven, dessen spezifische Energie es ist, die c^0-Empfindung zu vermitteln, erregen. Links wird also c^0 gehört, rechts dagegen, wo normale Verhältnisse bestehen, nur H, so daß der faktisch einfache Ton vom Patienten als Sekunde wahrgenommen wird.

Wie steht es nun mit der Erklärung der sekundären Klangerscheinungen seitens der Helmholtzschen Resonanzhypothese?

Wenn zwei dem Ohre gleichzeitig zugeleitete Töne zusammen schweben, so ist auch die Schwingungskurve der Gehörknöchelchenkette eine Schwebungskurve. Findet aber in der Basilarmembran eine Zerlegung der Klangwelle in die beiden Teiltöne statt, die an sich ohne Amplitudenschwankungen schwingen, so könnte man erwarten, daß die beiden Primärtöne glatt nebeneinander hinfließend gehört würden. Allein eine solche Erwartung wäre nur gerechtfertigt unter der Voraussetzung, daß die in Frage kommenden beiden Resonatoren im Ohre völlig isoliert wirkten. Diese Annahme macht jedoch Helmholtz nicht. Er betont vielmehr ausdrücklich, daß nach seiner Auffassung ein Ton nicht nur eine einzelne Faser errege, sondern daß auch deren Nachbarn beiderseits, allerdings in rasch mit ihrem wachsenden Abstande abnehmender Stärke, zum Mitschwingen kämen. Jeder von außen anlangende

---

[1]) Vgl. hierzu unter anderen Bezold, Münchener med. Wochenschr. **19** u. **20** (1900). — [2]) Vgl. Stumpf, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **21**, 100 ff., 1899. — [3]) Jacobson u. Blau, Lehrb. d. Ohrenheilk., Leipzig 1902.

Ton versetzt hiernach innerhalb der Basilarmembran eine Zone von gewisser Breite in Oszillationen, und beim Zusammenklange zweier einander nahe genug liegender Töne fallen die beiden Zonen zum Teil übereinander. In der gemeinschaftlichen Mittelzone schwingen die Basilarfasern gleichzeitig in dem Rhythmus beider Primärtöne, beschreiben also keine Sinuskurve sondern eine Klangkurve, eine Schwebungskurve; die zugehörigen Nerven werden abwechselnd stärker und schwächer erschüttert, und eben dies gibt die Veranlassung zu jenem Schwanken der Empfindungsintensität, welches mit dem Ausdruck „Schweben" bezeichnet wird. Sind die Primärtöne der Höhe nach nur sehr wenig verschieden, so decken sich die Zonen fast ganz. Man vernimmt dann wirklich auch nur eine einzige Tonhöhe und diese schwebend. Rücken die Primärtöne weiter auseinander, so müssen der Theorie nach die Schwebungen auf eine mehr oder weniger schmale Zwischenzone beschränkt sein und die von den Primärtönen maximal erregten Fasern mit gleichförmiger Amplitude schwingen. Daß die Beobachtungstatsachen hier mit der Helmholtzschen Hypothese übereinstimmen, hat Stumpf in seiner Tonpsychologie[1]) gezeigt. Man hört die Primärtöne ruhend und einen dritten, zwischen ihnen gelegenen, innerhalb des Ohres lokalisierten, weichen Ton, den Stumpf Zwischenton[2]) nennt, schwebend. Erreicht das Intervall der Primärtöne (in der ein- bis dreigestrichenen Oktave) ungefähr eine große Sekunde, so wird der Zwischenton meist undeutlich oder unhörbar. In diesem Falle und bei weiterer Zunahme der Höhendifferenz der Primärtöne wird auch der Resonanzhypothese gemäß die gemeinschaftliche Mittelzone so schmal, daß sie zur Wahrnehmung eines selbständigen Zwischentones nicht mehr ausreicht. Die Intensitätsschwankungen werden zwar noch empfunden, aber in der Beurteilung des Klangganzen an die Primärtöne selbst geknüpft bzw., wie Stumpf fand, an denjenigen von ihnen, auf welchen sich gerade die Aufmerksamkeit richtet. Daß jenseits einer gewissen Distanzgrenze der Primärtöne die Schwebungen wieder verschwinden, erklärt sich nach Helmholtz einfach daraus, daß dann die beiden Zonen keine Gemeinschaft mehr miteinander haben.

Der Umstand, daß in der viergestrichenen Oktave noch Töne zusammen schweben, deren Höhenunterschied mehr als 400 Schwingungen beträgt, zwingt zu der Annahme, daß hohe Töne die Basilarmembran in verhältnismäßig auffallender Breite erregen. Eine prinzipielle Schwierigkeit für die Helmholtzsche Theorie dürfte hierin aber kaum zu erblicken sein. Schlimmer wäre es, wenn R. Koenigs[3]) Behauptung, die Schwebungen tiefer Töne seien bis zum Intervall 1 : 10 bzw. 1 : 14 zu verfolgen, sich als richtig erwiesen hätte. Sie beruht jedoch auf einem Irrtum, der auf die Nichtbeachtung der Mitwirkung von Obertönen zurückzuführen ist. Schaltet man die in Frage kommenden Obertöne durch Interferenz aus, so fallen auch die betreffenden Schwebungen weg[4]).

R. Koenig ist überhaupt mehrfach als ein scharfer, obschon nicht glücklicher Gegner der Resonanzhypothese aufgetreten. Es war bereits früher

[1]) **2**, 480 ff., 1890. — [2]) Melde hat später diese Töne als resultierende Töne bezeichnet. (Sitzungsber. d. Marburger Naturw. Gesellsch., Nov. 1893; Pflügers Arch. 60.) — [3]) Pogg. Ann. **157**, 177 ff., 1876 und Wiedemanns Ann. **12**, 335, 1881. — [4]) C. Stumpf, Wiedemanns Ann. **57**, 680, 1896.

davon die Rede, daß er vergeblich versucht hat, die Einflußlosigkeit der Phasenverhältnisse der Teiltöne eines Klanges auf die Qualität seines Eindruckes, die eine notwendige Konsequenz der Helmholtzschen Theorie ist, zu widerlegen. Auch gehörte er[1]) zu denjenigen Autoren, die mit Nachdruck dafür eingetreten sind, daß das Ohr die Fähigkeit besitze, Schwebungen und regelmäßige Unterbrechungen eines Tones bei genügender Frequenz als einen Ton von entsprechender Schwingungszahl aufzufassen; eine Fähigkeit, die in direktem Widerspruche mit der Resonanzhypothese stehen würde, da dieser zufolge nur solche Töne aus einem Klange herausgehört werden können, die darin als pendelförmige Komponenten enthalten sind.

Was die sog. Unterbrechungstöne betrifft, so ist weiter oben[2]) gezeigt worden, daß sie entweder physikalischen Ursprungs oder Differenztöne sind. Sie bieten daher an sich keinerlei Veranlassung zu Einwänden gegen die Helmholtzsche Theorie und würden wohl nie als Grundlage zu solchen benutzt worden sein, wenn schon die ersten Beobachter sich die Mühe gemacht hätten, ihre Natur exakt aufzuklären.

Ebenso steht es mit den Kombinationstönen. Es ist eine alte Ansicht, daß die Schwebungen bei zunehmender Schnelligkeit in den Differenzton übergingen. Schon Lagrange und Young haben dieselbe vertreten, und R. Koenig hat sie in seinen eben erwähnten Untersuchungen wieder aufgenommen, indem er behauptete, die Schwebungen erzeugten bei einer gewissen Geschwindigkeit ebenso einen Ton wie die einzelnen Schläge eines Kartenblattes oder eines Holzbrettchens gegen ein rotierendes Zahnrad. Aber dieser Analogiebeweis ist völlig hinfällig. Der Ton, den die auf dem Zahnrade schleifende Karte hervorruft, entsteht gar nicht aus jenen Schlägen, sondern aus der mehr oder weniger pendelähnlichen Schwingungsbewegung, welche das vibrierende Kartenblatt der umgebenden Luft erteilt. Das Zahn für Zahn sich wiederholende Anschlagegeräusch ist eine für die Tonbildung ganz unwesentliche Nebenerscheinung, wie schon daraus hervorgeht, daß der Ton um so deutlicher wird, je leiser das Anstoßen der Karte an die Zähne vor sich geht. Betrachtet man ferner eine größere Anzahl Zweiklangkurven, so zeigen wohl Zweiklänge vom Intervall $n : n + 1$ schöne regelmäßige Schwebungswellen, die einen Augenblick zu der Annahme verleiten könnten, jede Schwebungskuppe wirke gleichsam wie ein einzelner Stoß auf den Steigbügel; die meisten Kurven von anderen Intervallen lassen uns jedoch im Zweifel, ob und welche Differenztöne man aus ihrer Form herauslesen soll, und das etwaige Ergebnis steht nicht immer im Einklang mit der Beobachtung[3]). Helmholtz hat denn auch die Entstehung von Differenztönen aus Schwebungen ausdrücklich abgelehnt und auf Grund einer mathematischen Deduktion[4]) die Hypothese aufgestellt, daß das Trommelfell und seine Adnexa als der Ursprungsort der subjektiven Kombinationstöne anzusehen seien. Daß diese Hypothese das Richtige trifft, davon habe ich mich durch eine demnächst[5]) zu veröffentlichende experimentelle Untersuchung überzeugt, welche, wie schon erwähnt, ergeben hat, daß Telephonmembranen und Membranen

---

[1]) Pogg. Ann. **157** (1876). — [2]) Siehe Abschnitt III c. — [3]) Vgl. hierzu meine Abhandlung in Pflügers Arch. **78**, 505, 1900. — [4]) Lehre von den Tonempfindungen, Beilage 12. — [5]) Voraussichtlich in Pflügers Arch. f. Physiol. 1905.

von der Form des Trommelfelles, wenn sie von zwei Primärtönen zugleich in Schwingungen versetzt werden, auch objektive, Resonatoren erregende, Kombinationstöne hervorbringen. Die physikalische Begründung dieser Kombinationstöne muß freilich eine andere als die von Helmholtz für das Trommelfell versuchte sein. Denn letztere setzt, von anderen Schwierigkeiten abgesehen, eine Amplitude der Primärtöne als nötig voraus, welche so groß ist, daß auch noch das Quadrat der Verschiebungen auf die Bewegungen Einfluß erhält, während in Wirklichkeit selbst verklingende Primärtöne gut hörbare Differenztöne hervorzurufen vermögen. Dennert[1]) hat angegeben, daß auch Personen ohne Trommelfell und solche, bei denen von der ganzen Gehörknöchelchenkette nur der Steigbügel erhalten ist, Kombinationstöne hören können, und von anderer Seite sind mir dies bestätigende, allerdings bisher nicht publizierte, Beobachtungen mitgeteilt. Diese Fälle dürften damit zu erklären sein, daß bei den betreffenden Individuen eben die Membran des runden Fensters ausreicht, um, nach Analogie der Telephonmembranen wirkend, Kombinationstöne zu erzeugen.

Wundt[2]) hat, um die Differenztöne zu erklären, unter Aufgabe des Prinzips von der spezifischen Energie der einzelnen Acusticusfasern die Hypothese aufgestellt, daß jeder Ton auf einem doppelten Wege ins Zentralorgan und damit zum Bewußtsein gelange. Erstens soll derselbe der Helmholtzschen Resonanzhypothese gemäß vom Cortischen Organe aufgenommen und zweitens durch die Kopfknochen direkt auf den Stamm des Acusticus übertragen werden, wobei jede Faser des letzteren jeden Ton leiten kann. Treffen nun zwei Primärtöne innerhalb einer und derselben Nervenbahn zusammen, so interferieren sie und dadurch kommt es zur Wahrnehmung der Schwebungen bzw. Kombinationstöne. Diese Annahme setzt zunächst voraus, daß der Acusticusstamm durch Schall erregbar sei. In der Tat ist das schon von Joh. Müller wie etwas Selbstverständliches ausgesprochen und neuerdings wieder von J. R. Ewald (1890) behauptet worden auf Grund der Beobachtung, daß labyrinthlose Tauben unter Umständen auf Schall mit Bewegungen reagieren. Die Nachprüfung seiner Befunde durch andere Physiologen[3]) hat aber ergeben, daß diese Reaktionen selbst dann noch stattfinden, wenn der Acusticus längst degeneriert ist, und daß sie auf taktiler Empfindung des Schalles, wie sie auch bei absolut tauben und taubstummen Menschen vorkommt, beruhen. Was ferner die cerebrale Entstehung von Schwebungen und Differenztönen betrifft, so ist sie mehr als unwahrscheinlich. Daß wir die Schwebungen zweier, selbst sehr leiser Töne auch dann noch hören, wenn der eine nur das rechte, der andere nur das linke Ohr von außen erregt, erklärt sich genügend daraus, daß jeder der Töne durch die Kopfknochen auch auf das zweite Ohr übertragen wird[4]). Hierfür brauchen wir eine Interferenz von Tonerregungen im Zentralorgan nicht zu postulieren. Wenn es anderseits eine solche wirklich gäbe, wäre nicht zu begreifen, warum bei diotischer Verteilung zweier Primärtöne raschere Schwebungen

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **24** (1887). — [2]) Philos. Stud. **8**, 641, 1893; vgl. aber auch die modifizierte Darstellung in Wundts Grundz. d. Physiolog. Psycholog. (5), **2**, 137, 1902. — [3]) Vgl. die Darstellung der interessanten Polemik bei **M. Kamm**, Klin. Vortr. a. d. G. d. Otologie u. Pharyngo-Rhinologie **3**, 91, Jena 1899. — [4]) Vgl meine Abhandlung in Pflügers Arch. **61**, 544, 1895.

und Differenztöne nur unter ganz besonderen Versuchsbedingungen gehört werden[1]); auch müßte man dann erwarten, daß zwei subjektive Töne oder ein subjektiver und ein objektiver bei passendem Verhältnis der Schwingungszahlen zusammen schweben. Das ist aber nach den Beobachtungen von Stumpf[2]) und Urbantschitsch[3]) nicht der Fall, und die vereinzelten Ausnahmen dieser Regel, die Wundt[4]) anführt, können ihre Ursache in einer Interferenz innerhalb des Cortischen Organes haben. Die Wundtsche Erweiterung der Resonanzhypothese entbehrt also der tatsächlichen Stützen.

L. Hermann war zeitweilig[5]) der Meinung, es wäre nötig, die Helmholtzsche Theorie, so elegant sie sei, fallen zu lassen und dem Ohre die Eigenschaft zuzuschreiben, jede Periodik als Ton zu empfinden. Später[6]) kehrte er im Prinzip zur Resonanztheorie zurück, fügte aber als Ergänzung die Hypothese hinzu, daß jeder Resonator des Cortischen Organes auf seine Acusticusfaser nur durch Vermittelung einer besonders gearteten Nervenzelle, einer „Zählzelle", wirke. Diese Annahme hatte den speziellen Zweck, die „Intermittenztöne" zu erklären. Seit aber gezeigt ist, daß die letzteren entweder physikalisch entstehen oder Differenztöne sind, ist die „Zählzellen"-hypothese überflüssig geworden. Die Kombinationstöne wollte Hermann darauf zurückführen, daß die Schwingungsformen der Primärtöne zu einer Resultierenden verschmelzen, welche einer Pendelschwingungsform genügend ähnlich sei, um einen selbständigen „Mittelton" zu geben. Dieser Versuch ist jedoch schon insofern mißglückt, als es Hermann selbst nicht recht und anderen gar nicht gelungen ist, die Existenz solcher Mitteltöne zu verifizieren.

Ebbinghaus[7]) hält den allgemeinen Grundgedanken der Helmholtzschen Theorie, die Auffassung der Basilarmembran als eines Resonatorenapparates, für durchaus unanfechtbar, sieht aber die spezifischen Energien der nervösen Elemente für nicht so weitgehend gesondert an, wie es bei Helmholtz geschieht. Ein Ton von der Schwingungszahl n vermag nach ihm auch die auf die Untertöne $\frac{1}{2}\,n$, $\frac{1}{3}\,n$, $\frac{1}{4}\,n$ usw. abgestimmten Fasern in Mitschwingungen zu versetzen, wobei dieselben unter Bildung von Knotenpunkten Teilschwingungen vollführen, und die zugehörigen Nerven tragen dann alle mit zu der Empfindung des Tones n bei. Erklingt nun beispielsweise eine große Terz, also zwei Töne vom Intervall 4 : 5, so wird auch das auf 1 abgestimmte Gebiet der Basilarmembran von beiden Rhythmen zugleich zu Teilschwingungen veranlaßt. Dabei aber kommt die objektive Bewegung in jeder Schwingungsperiode einmal durch Interferenz nahezu zum Stillstand, und die beteiligten nervösen Elemente erleiden somit gerade in dem ihnen bestgeläufigen Rhythmus 1 starke Gegensätze von Reizung und Ruhe: sie reagieren mit dem Differenztone 1. Ebbinghaus bringt außer diesem Paradigma noch einige andere zur Erläuterung seiner Auffassung von der Entstehung der sekundären Klangerscheinungen bei. Dieselbe ist allerdings

---

[1]) Vgl. meine Abhandlung in Pflügers Arch. **61**, 544, 1895. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **21**, 117 ff., 1899. — [3]) Pflügers Arch. **24**, 22, 1881. — [4]) Grundz. d. Physiol. Psychol. (5), **2**, 108, 1902. — [5]) Pflügers Arch. **49**, 499 ff. — [6]) Ebenda **56**, 467, 1894. — [7]) Grundzüge d. Psychol. **1**, 317 ff., Leipzig 1902.

nicht frei von prinzipiellen Schwierigkeiten, weshalb denn auch Ebbinghaus selbst es fur notig gefunden hat, gewisse Hilfshypothesen zu machen.

Ich gehe aber darauf nicht näher ein, weil die Ebbinghaussche ebenso wie die Hermannsche Theorie der Kombinationstöne durch meinen oben erwähnten Nachweis der physikalischen Entstehung dieser Töne im Mittelohre inzwischen gegenstandslos geworden ist.

Von denjenigen Akustikern, welche die Helmholtzsche Resonanzhypothese völlig über Bord werfen wollen, sei hier zuerst Max Meyer[1]) genannt. Nach ihm vollzieht sich die Klanganalyse im Ohre in der Weise, daß, vom unteren Ende der Schneckentreppe angefangen, je nach der objektiven Klangstärke ein kürzeres oder längeres Stück der Basilarmembran in Schwingungen gerät, wobei es sich in mehrere verschieden schnell oszillierende Abteilungen teilt. Jede Abteilung entspricht einem Tone. Ihre Länge bedingt die Intensität ihre Schwingungsfrequenz die Tonhöhe der Empfindung. Diese Theorie stimmt in einigen Fällen vortrefflich mit der Beobachtung überein, in anderen nicht. Sie hat das Verdienst, auf manche interessante Fragen zu führen, ist aber, abgesehen von ihrer skizzenhaften Form, zu einseitig auf die Erklärung der Klanganalyse sowie der Differenztöne berechnet und nimmt zu wenig auf andere wichtige Dinge Rücksicht, als daß sie irgendwie wirksam mit der Resonanzhypothese konkurrieren könnte. Ähnliches ist von der Theorie E. ter Kuiles[2]) zu sagen. Sie geht davon aus, daß der Steigbügel bei der Vorwärtsbewegung ein gewisses Quantum Lymphe vor sich herschiebt und dabei eine gewisse Strecke der Basilarmembran ausbuchtet. Diese Strecke ist um so länger, je größer die Schwingungsdauer, also je tiefer der Ton ist: die Länge der Vorwölbungsstrecke der Basilarmembran ist für die Tonhöhe der Empfindung maßgebend. Ist neben einem tieferen Tone noch ein höherer vorhanden, dem ein kürzeres Stück der Basilarmembran entspricht, so ändert sich der Modus der Gesamterregung des Nervenendapparates und damit die Wahrnehmung die Klangfarbe. Wie aber bei solcher Überlagerung der Töne in der Basilarmembran eine präzise Klanganalye möglich ist, dies gerade geht aus ter Kuiles Ausführungen nicht mit der wünschenswerten Klarheit hervor. Die übrigen Probleme des Hörens werden darin höchstens flüchtig gestreift.

Während Meyer und ter Kuile vorwiegend den Anfangsteil der Basilarmembran für die Schallbewegung im Labyrinth in Anspruch nehmen, vertritt J. Rich. Ewald[3]) die Anschauung, daß ein Ton, der das Ohr trifft, die ganze Basilarmembran in Mitschwingungen versetzt, indem sie in eine Reihe stehender Wellen zerlegt wird. Die Gesamtheit dieser Wellen, das Schallbild, wie Ewald es nennt, löst durch Vermittelung der Acusticusfasern im Gehirn die Tonperzeption aus. Jedem Tone entspricht ein für ihn charakteristisches Schallbild, und die einzelnen Schallbilder unterscheiden sich voneinander durch die größere oder geringere Wellenlänge der stehenden Schwingungen. Sind mehrere gleichzeitig vorhanden, so findet zwar eine Superposition, aber keine Änderung der Wellenlängen statt, so daß jedes Schall-

---

[1]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **16**, 1 und **17**, 1, 1898; auch Pflügers Arch. **78**, 346, 1899 und **81**, 61, 1900. — [2]) Pflügers Arch. **79**, 484, 1900. — [3]) Ebenda **76**, 147, 1899 und **93**, 485, 1903.

bild für sich genügend kenntlich bleibt. Auf diese Weise wird die Klangzerlegung möglich. Alle Schallerregungen, bei denen irgendwie die Bildung stehender Wellen verhindert wird, nehmen den Charakter des Geräusches an. Diese Theorie ist eine Konsequenz der Tatsache, daß es Ewald gelungen ist, ihr entsprechende Schallbilder und Schallzerlegungsbilder auf schlaff gespannten, mit Öl bestrichenen Gummimembranen, die teils durch Stimmgabeln, teils durch einen besonderen Schwingungsapparat in Vibrationen versetzt wurden, sichtbar zu machen. Auch in Wasser befindliche Membranen sind dazu geeignet und die Spannungsverhältnisse der Basilarmembran für die Theorie günstig. Um die Eigentümlichkeiten des Ohres möglichst getreu nachzubilden, hat Ewald neuerdings eine Membran von nur 0,55 mm Breite und 8,5 mm Länge hergestellt. Auf ihr ließen sich Töne beobachten im Umfange von sechs Oktaven. Der mittelste Ton, von dessen Wellen Ewald seiner zweiten Publikation ein Photogramm beigegeben hat, war a^4, der tiefste sichtbare h^1. Theoretisch hätte die Membran indessen noch F zeigen können. Immerhin liegt selbst diese Grenze reichlich zwei Oktaven über dem unteren Ende der menschlichen Tonperzeption, und es bleibt noch zu beweisen, daß die Schallbildertheorie imstande ist, auch die tiefsten Tonempfindungen zu erklären. Die Erregung der Membran gelingt ebensowohl in der Luft — es genügt, eine tönende Galtonpfeife in ihre Nähe zu bringen — wie in der von Ewald konstruierten Camera acustica. Letzterer Apparat, ein Ohrmodell, ist ein ganz mit Wasser gefüllter Kasten, der zum Zweck der Beleuchtung und mikroskopischen Betrachtung der Membran Glaswände hat. Der Innenraum ist durch eine passend gebogene, die Schallbildermembran aufnehmende Scheidewand in zwei Teile, die die *Scala vestibuli* und die *Scala tympani* repräsentieren, zerlegt. In der einen Hälfte ist eine *Fenestra rotunda* angebracht, in der anderen eine das ovale Fenster vertretende Membran, die durch eine „Columella“ mit der Membran eines Schalltrichters („Trommelfell und Gehörgang“) verbunden ist. Bringt man eine Tonquelle vor den Schalltrichter, so gerät die Schallbildermembran alsbald in Schwingungen; ebenso wenn man, um die direkte Knochenleitung nachzuahmen, den Stiel einer klingenden Gabel unmittelbar auf eine Wand der Camera aufsetzt. Die elegante Demonstrierbarkeit der Schallbilder gibt der Ewaldschen Theorie unzweifelhaft insofern ein Übergewicht über die Helmholtzsche, als es bisher nie gelungen ist und vielleicht nie gelingen wird, an einer Membran von der Art der Basilarmembran solche Schwingungen zu beobachten, wie sie von der Resonanzhypothese gefordert werden. Auch ist der Umstand für Ewalds Hörtheorie entschieden günstig, daß dieselbe die wichtige Tatsache des Vorkommens von Toninseln und Tonlücken in sehr einfacher Weise erklären würde. Ewald teilt in dieser Hinsicht mit, daß er öfter Membranen gefunden habe, die infolge kleiner Unregelmäßigkeiten in ihrem Bau auf gewisse Schwingungszahlen nicht ansprachen, während die nächst höheren und nächst tieferen Töne tadellose Wellenbilder lieferten. Aber ein abschließendes Urteil über die Theorie ist nicht möglich, bevor sie nicht eine weitere Ausgestaltung erfahren hat. Sie muß unter anderem noch an vielen einzelnen Tatsachen aus der Lehre von der Klanganalyse und den Schwebungen, die Ewald bis jetzt noch gar nicht in Beziehung zu seiner Hypothese gebracht oder nur kurz berührt hat, eingehend erprobt werden.

e) Kopfknochenleitung. Diotisches Hören. Schallokalisation.

Die Kette der Gehörknöchelchen bildet nicht den einzigen Weg, auf dem Schall zum inneren Ohre gelangen kann. Wir hören nicht bloß durch Luftleitung, wie man kurzweg die durch den Paukenhöhlenapparat vermittelte Übertragung von Schallschwingungen aus der Luft auf das Labyrinth nennt, sondern auch durch Knochenleitung (cranio- oder osteotympanale Leitung), und zwar kann die letztere entweder eine direkte oder indirekte sein. Von einer direkten Kopfknochenleitung spricht man, wenn die Schallquelle unmittelbar ihre Schwingungen an den Schädel abgibt, wenn also beispielsweise bei der Untersuchung eines Ohrenkranken eine Stimmgabel auf den Scheitel oder auf den Warzenfortsatz hinter der Ohrmuschel aufgesetzt wird. Um indirekte Knochenleitung handelt es sich dagegen, wenn in der Luft vorhandene Tonwellen den Kopf treffen, in ihn eintreten und so zur Basilarmembran dringen. Theoretisch betrachtet ist die gewöhnliche Luftleitung stets mit indirekter Knochenleitung verbunden. Denn die Schallwellen werden außer der Gehörgangsöffnung immer auch die diese umgebenden Partien des Schädels erreichen oder aus der Luft im Gehörgang auf dessen Wandungen übergehen können.

Setzt man den Stiel einer nicht allzu leise tönenden Stimmgabel auf irgend einen Punkt des Kopfes, so pflanzt ihr Ton sich mit größerer oder geringerer Stärke zu beiden Felsenbeinen fort und wird diotisch vernommen, wobei die Empfindung des rechten Ohres mit der des linken in der Wahrnehmung zu einer einzigen verschmilzt, wie es immer bei gleichzeitigen qualitativ identischen Gehörseindrücken der Fall ist. Gewisse Partien des Schädels, wie die Wangenmuskulatur und die Nasenspitze, leiten den Schall schlecht. Auf dem Warzenfortsatz tönt die Gabel länger. Ist der Ton auch hier verklungen, so wird er wieder hörbar, wenn man die Gabel vor das Ohr bringt, also Luftleitung anwendet. Diese Tatsache ist in der Ohrenheilkunde als Rinnescher Versuch bekannt und diagnostisch wichtig. Hensen[1]) gibt an, daß eine ziemlich dicht an das Ohr gehaltene und eben nicht mehr gehörte Gabel wieder vernehmlich wird, wenn man ihren Stiel gegen die Zähne drückt. Dies ist richtig, sofern man den Ausdruck „ziemlich" beachtet. Dagegen finde ich bei Benutzung meiner a^1-Gabel, daß dieselbe, nachdem sie bei geöffneten Lippen und geschlossenen Kiefern von den oberen Schneidezähnen aus abgeklungen ist, noch deutlich und relativ andauernd tönt, wenn ich die Zinkenspitzen dem Ohreingange so weit, als es irgend möglich ist, nähere. Stelle ich dasselbe Experiment mit geöffneter Mundhöhle an, so ist das Überwiegen der Luftleitung über die Knochenleitung unsicher, was damit zusammenhängt, daß die auf die oberen Schneidezähne gesetzte a^1-Gabel lauter und länger klingt, wenn der Mund offen ist, als wenn die Zähne zusammengebissen werden. Ist der Ton einer auf dem Scheitel stehenden oder mit den Zähnen gefaßten Gabel unhörbar geworden, so tritt er wieder auf, wenn die Ohren verstopft werden, und ist er dann abermals verklungen, so kann man

[1]) Physiologie des Gehörs in Hermanns Handbuch der Physiologie 3 (2), 26, 1880.

ihn noch vernehmen, wenn der Stiel der Gabel in den Gehörgang hineingeschoben wird[1]).

Für die Lokalisation des Tones einer mit dem Ende ihres Stieles irgendwo auf dem Schädel ruhenden Gabel ist der Satz maßgebend, daß wir einen diotisch vernommenen Schall nach der Seite des stärker erregten Ohres verlegen. Es ist dies durchaus nicht immer die Seite, auf welcher sich die Gabel befindet. Vielmehr wird eine auf die oberen Partien der rechten Kopfseite aufgesetzte Gabel, soweit die bisherigen Beobachtungen der Autoren einen Schluß gestatten, in der Regel links gehört und umgekehrt. Liegt die Ansatzstelle der Gabel in der den Kopf vertikal von vorn nach hinten halbierend gedachten Medianebene, so wird der beide Hörnerven gleich stark erregende Ton nach Kessel[2]) von jugendlichen Personen in die Ohren projiziert, im mittleren Lebensalter in die Medianebene und zugleich in die Ohren, von älteren Leuten in die Medianebene bzw. an die Ansatzstelle; doch kommen hierbei viele individuelle Verschiedenheiten vor.

Setzt man eine klingende Gabel median auf den Kopf einer Versuchsperson und läßt dieselbe das eine Ohr mit dem Finger oder durch Andrücken der Hohlhand verschließen, so rückt der Ton unter Zunahme seiner Intensität in dieses hinein. Werden beide Ohren in gleicher Weise geschlossen, so erscheint der Ton in der Medianebene im Innern des Schädels. In Ermangelung einer anderen Tonquelle kann man sich hiervon überzeugen, indem man einen Vokal, am besten *u*, singend die Ohren abwechselnd lose verstopft und wieder öffnet. Auch der Ton einer mit dem Stiel gegen die rechte Schläfe gedrückten Gabel, der für gewöhnlich, wie eben erwähnt, links gehört wird, springt sofort in das rechte Ohr, wenn man die Hand auf dessen Muschel legt.

E. H. Weber[3]) hat zuerst ausdrücklich auf das Hineinwandern eines durch die Kopfknochen zugeführten Tones in das verschlossene Ohr aufmerksam gemacht, weshalb diese Beobachtung auch der Webersche Versuch genannt wird. Für das Verständnis desselben ist es nötig, sich daran zu erinnern, daß die Gehörknöchelchenkette auch bei der direkten Kopfknochenleitung in Schwingungen versetzt wird. Die Oszillationen des Trommelfells werden dabei ebenso wie diejenigen der Gehörgangswände auf die Luft im Meatus übertragen, und so fließt der Ton einer auf den Schädel gesetzten Gabel aus den Ohren nach außen ab, wovon man sich durch geeignete Auskultationsmethoden ohne Mühe überzeugen kann. Nach Mach[4]) wird nun durch einen leichten Verschluß des Gehörganges dieser Schallaustritt gehindert und daher das durch die Differenz von Zu- und Abfluß bestimmte Quantum Schallenergie in dem verstopften Ohre größer als in dem offenen, was eben in einer Verstärkung des Tones auf der Seite des ersteren zum Ausdruck kommt. Verschiedene andere Forscher haben den Weberschen Versuch auf eine Intensitätszunahme infolge von Reflexion der Tonwellen an der den Ohreingang obturierenden Fläche zurückzuführen versucht. Machs Erklärung scheint

[1]) Vgl. hierzu Rinne, Prager Vierteljahrsschrift f. prakt. Heilkunde **1**, 71 ff., 1855 und Zeitschr. f. rationelle Medizin, 3. Reihe, **24**, 26, 1865, sowie Hensen a. a. O., der eine Gabel von 1000 Schwingungen an den Zähnen 4″, bei Schluß des Ohres weitere 4″ und nach Einführung in den Gehörgang noch 1″ bis 3″ hörte. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 130, 1882. — [3]) De pulsu, auditu et tactu, Lips. 1834, p. 41. — [4]) Berichte d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **48** (2), 283, 1863.

mir indessen, von theoretischen Erwägungen abgesehen, schon aus experimentellen Gründen den Vorzug zu verdienen. Es ist nämlich von mehreren Seiten festgestellt und leicht zu bestätigen, daß die Tonverstärkung beim Weberschen Versuch besonders deutlich ist, wenn das Ohr nur lose verschlossen wird, dagegen merklich nachläßt, wenn man den Finger tief und fest einführt. Nach der Reflexionstheorie ist dies nicht recht verständlich, wohl aber nach der Machschen Auffassung, insofern der feste Verschluß den Schallabfluß durch den Finger hindurch wieder begünstigt. Zweitens tritt die Verlegung eines median und osteo-tympanal zugeleiteten Tones in eines der Ohren auch ohne jede Veranlassung zu einer Reflexion bei solchen Mittelohrkrankheiten auf, welche die Schwingungen der Knöchelchenkette oder des Trommelfells und damit die Abgabe von Schall nach außen beeinträchtigen; weshalb denn auch der Webersche Versuch in der otiatrischen Diagnostik eine wichtige Rolle spielt. Übrigens bedürfen die bei demselben in Betracht kommenden Verhältnisse im einzelnen noch der genaueren Untersuchung und gewisse Widersprüche der Aufklärung. So finde ich in Übereinstimmung mit einer gelegentlichen Angabe von Politzer, daß der Ton meiner auf die Schneidezähne gesetzten a^1-Gabel jedesmal lauter wird, sobald ich durch Tensoranspannung die Schwingungen des Paukenapparates verringere. Bei dem oben schon erwähnten Gelléschen Versuch dagegen, bei dem statt des Zuges von innen ein Druck von außen auf das Paukenfell wirkt, tritt das Gegenteil ein, während wiederum das negative ebenso wie das positive Valsalvasche Experiment bei vielen, aber nicht bei allen Personen das Webersche Phänomen hervorruft.

Hält eine Versuchsperson eine tönende Gabel, ohne irgendwie den Kopf damit zu berühren, vor ihr eines Ohr, so kann man, mittels Stethoskops verschiedene Partien des Schädels auskultierend, an der ganzen Oberfläche des Kopfes den Ton hören. Versuche dieser Art sind schon von Harleß[1]) angestellt und später unter anderen von Mader[2]) mittels seines sehr fein reagierenden Otomikrophons bestätigt, ja sogar für sehr leise Schallquellen gültig gefunden worden. Die Auskultation ergibt ferner, daß der aus der Luft von dem einen Ohre aufgenommene Ton auch zum anderen gelangt und aus demselben mit merklicher Stärke herausklingt. Für diese Hinüberleitung sind zwei Wege vorhanden. Einerseits können die Tonwellen aus der Luft direkt auf die Kopfknochen übergehen und von ihnen an alle Teile beider Ohren abgegeben werden; anderseits können das Trommelfell, das ovale Fenster, das runde Fenster sowie das Labyrinthwasser des zuerst erregten Ohres durch ihre Vibrationen die Kopfknochen in Mitschwingungen versetzen, und alle gleichnamigen Stücke des anderen Ohres können diese von Felsenbein zu Felsenbein geleiteten Oszillationen aufnehmen. Ich möchte die letztere Art der intrakraniellen Schallfortpflanzung kurz als metotische Knochenleitung bezeichnen. Nach Harleß darf man derselben freilich keinen allzugroßen Anteil an der Schallübertragung zuschreiben. Denn wenn er an der Leiche das eine Ohr auskultierte, während in der Luft vor dem anderen eine Gabel klang, so war die Intensität nach der Zerstörung beider Trommelfelle

[1]) Wagners Handwörterbuch der Physiologie **4**, 361 f., 1853. — [2]) 13. Intern. med. Kongreß, Paris 1900 und Ber. d. Wiener Akad., math.-nat. Kl., **109** (3), 1900.

nicht auffallend geringer als vorher. Dagegen fand er bei anderen Versuchen, daß die Schädelknochen überraschend leicht Schall aus der Luft aufnehmen und weiter leiten. (Leider fehlt die nicht unwichtige Angabe über die Höhe der benutzten Töne.)

Jedenfalls ist sicher, daß durch die indirekte Kopfknochenleitung selbst sehr schwache Töne auch zu dem von der Schallquelle entfernteren Gehörorgan gelangen. Man nähere eine Stimmgabel dem einen Ohre so weit, daß ihr Abstand noch etwas geringer ist als die Distanz der Ohren, warte, bis sie verklungen, und führe sie hierauf möglichst dicht an die Gehörgangsöffnung. Sie wird dann wieder hörbar, aber ihr Ton kann das andere Ohr nicht mehr auf dem Wege durch die Luft außen um den Kopf herum erregen, was natürlich bei Experimenten dieser Art immer sorgfältig vermieden werden muß. Wenn man nun das zweite Ohr lose mit dem Finger schließt, so wird der Ton alsbald lauter und scheint dem Kopfe näher zu kommen. Wird der Finger wieder entfernt, so wird der Ton wieder leiser und rückt scheinbar vom Ohre weg. Diese Beobachtung, welche sich mit allerdings allmählich abnehmender Deutlichkeit bis nahe zum völligen Erlöschen des Klanges verfolgen läßt, ist nichts anderes als eine Modifikation des Weberschen Versuchs, und beweist, daß auch das zweite Ohr durch den Kopf [1]) hindurch erregt wird. Sie ist früher von mir [2]) in etwas anderer Form angestellt und inzwischen von verschiedenen Seiten bestätigt worden, so von E. Bloch [3]), der zugleich ihre Bedeutung für die Ermittelung einseitiger kompletter Taubheit anerkannt hat.

Leitet man von zwei der Höhe nach wenig verschiedenen Tönen den einen dem rechten, den anderen dem linken Ohre unter solchen Kautelen zu, daß jeder zu dem entfernteren Gehörorgan nur durch die Kopfknochen gelangen kann, so hört man dennoch die Stöße. Ich habe derartige diotische Schwebungen noch mit Stimmgabel-Primärtönen aus der Mitte der Kontraoktave hervorrufen können [4]) und möchte mit Rücksicht auf gewisse pathologische Beobachtungen glauben, daß die metotische Knochenleitung sich um so mehr an der Schallübertragung durch den Kopf beteiligt, je tiefer die Primärtöne sind.

Diotische Schwebungen sind unter geeigneten Umständen selbst dann noch zu hören, wenn die Primärtöne eine so geringe Stärke haben, daß sie einzeln nicht wahrgenommen werden [5]), wie denn überhaupt nach den Beobachtungen mehrerer Forscher zwei Schallreize, deren jeder für sich unterschwellig ist, einander bei diotischem Zusammenwirken gleichsam über die Schwelle zu heben vermögen. Die Frage, ob die diotischen Schwebungen auch in diesem Falle so zu erklären sind, daß eben infolge der Kopfknochenleitung jedes der Cortischen Organe beide Töne empfängt, oder ob man mit Wundt und anderen annehmen soll, daß der von rechts und der von links kommende Ton sich erst im Zentralorgan begegnen und dort miteinander interferieren, muß meines Erachtens mit Rücksicht auf die gegen die zweite Auffassung sprechenden theoretischen und experimentellen Gründe in dem zuerst genannten Sinne

[1]) Daß hierbei die Schallübertragung von Ohr zu Ohr durch die Tuben stattfinde, darf als in der Regel ausgeschlossen betrachtet werden. — [2]) Zeitschrift f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **2**, 111, 1891. — [3]) Zeitschr. f. Ohrenheilk. **27**, 267 ff. — [4]) Arch. f. Ohrenheilk. **52**, 151, 1901. — [5]) Silvanus P. Thompson, Philos. Magaz. (5), **4**, 274, 1877.

beantwortet werden. Ich befinde mich hierbei in Übereinstimmung mit Stumpf und Fechner, welcher letztere darauf aufmerksam gemacht hat, daß ein Schall, der auf irgend einem Wege durch die Kopfknochen von einem Ohre zum anderen dringe, nicht an sich hörbar zu sein, nicht selbst die Schwelle zu übersteigen brauche, wenn er nur ausreicht, einem wenig unterhalb der Schwelle befindlichen Schalle den zum Überschreiten derselben eben hinreichenden Zuwachs zu erteilen [1]).

Die diotischen Schwebungen unterscheiden sich von den gewöhnlichen monotischen, welche durch die Zuleitung beider Primärtöne zu einem und demselben Ohre erzeugt werden, dadurch, daß sie einen anderen, milderen Charakter haben und die Grenze, an der sie infolge zu großer Frequenz unhörbar werden, erheblich niedriger liegt. So fand Stumpf [2]), mit Stimmgabeln der großen Oktave experimentierend, daß diotisch nicht mehr als 16 bis 20 Schwebungen in der Sekunde hörbar waren; in der kleinen Oktave lag das Maximum bei 32 bis 40, in der eingestrichenen ungefähr bei 50, in der nächsthöheren etwa bei 70. In der dreigestrichenen Oktave sind die Schwebungen zweier an beide Ohren verteilter Gabeln in allen Fällen nur sehr undeutlich.

Die diotisch getrennte Zuleitung zweier Primärtöne ist ein gutes Hilfsmittel, um die Dissonanz des so gehörten Zweiklanges unabhängig von der Rauhigkeit der Schwebungen zu studieren. Mit der letzteren zugleich fallen nun aber gewöhnlich auch die Kombinationstöne weg, weshalb manche mit Dove [3]) geglaubt haben, Differenztöne kämen überhaupt nie zustande, wenn der eine Primärton vor dem rechten, der andere vor dem linken Ohre klingt. Daß diese Behauptung in so extremer Form nicht zutrifft, davon habe ich mich im Laufe einer Untersuchung: „Über die Wahrnehmung und Lokalisation von Schwebungen und Differenztönen“ [4]) überzeugt. Sind beide Primärtöne gleich laut, so hört man freilich keinen Differenzton, weil dann jederseits der durch oder um den Kopf herum zum anderen Ohre übergeleitete Ton auf diesem Wege zu viel an Intensität eingebüßt hat, als daß er mit dem direkt von außen kommenden, relativ lauteren noch einen vernehmlichen Kombinationston erzeugen könnte. Überwiegt aber der eine Primärton in solchem Grade an Stärke, daß er in dem anderen Ohre mit dem dortigen Primärtone in passendem Intensitätsverhältnis zusammentrifft, so hört man hier, also auf der Seite des leiseren Primärtones, den Differenzton.

Befinden sich beide Primärtonquellen in der Medianebene, so verlegt man auch den Differenzton in diese. Treffen die Primärtöne den Beobachter von derselben Seite, so wird der Kombinationston in oder unmittelbar vor dem Ohre, auch wohl ein wenig von hinten und unten kommend, gehört, wobei sein Ort alle Bewegungen des Kopfes mitmacht, als ob er an demselben fixiert wäre. Hierin zeigen die Differenztöne ein Verhalten, das von dem der Schwebungen durchaus abweicht. Bei diesen wechselt nämlich die Richtung und Entfernung wesentlich mit derjenigen der Primärtöne, und zwar lassen sich meine mannigfachen Beobachtungen hierüber in folgende Sätze zusammenfassen: Für die Lokalisation der Schwebungen zweier Töne

---

[1]) Vgl. hierzu meine Abhandlung in Pflügers Archiv **61**, 544, 1895. — [2]) Tonpsychol. **2**, 470, 1890. — [3]) Pogg. Ann. **107**, 652, 1859. — [4]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **1**, 81, 1890.

ist bei ungleicher Intensität der letzteren unter allen Umständen die Richtung und Entfernung, aus der uns der stärker erregende Ton trifft, maßgebend. Ist die relative Intensität der Primärtöne gleich, so gehen die Schwebungen aus der Region zwischen den beiden Tonquellen hervor. Ein spezieller Fall hiervon ist es, daß die Stöße bei Aufstellung der Schallquellen rechts und links von der Medianebene in diese projiziert werden.

Hören wir durch Luftleitung einen in der Medianebene erzeugten Schall, so findet bei gleicher Hörschärfe beider Ohren auch mediane Lokalisation statt. Abweichungen pflegen bei aufmerksamen Versuchspersonen nicht vorzukommen. Um so schwieriger ist hierbei die genauere Beurteilung der Richtung, aus welcher der Schall kommt. Ich habe nur vereinzelte und dann in der Regel jugendliche Personen gefunden, die in dieser Beziehung keine Fehler bei einer größeren Anzahl von Versuchen machten. Im allgemeinen werden Oben, Unten, Vorn und Hinten in verschiedener Weise miteinander verwechselt, und die objektive Unrichtigkeit der irrtümlichen Angaben steht dabei gewöhnlich in einem eigentümlichen Gegensatz zu der subjektiven Sicherheit des Urteils.

Die Medianlokalisation ist die Folge der gleich starken Erregung beider Gehörorgane. Sie tritt daher — wieder beiderseits gleiche Hörschärfe vorausgesetzt — auch ein, wenn von zwei unisonen und gleich lauten Tonquellen, etwa Stimmgabeln, die eine vor das rechte, die andere vor das linke Ohr gehalten wird, falls nicht etwa, was zuweilen vorkommt, die beiden Empfindungen räumlich getrennt bleiben. Bezüglich des scheinbaren Abstandes einer median lokalisierten Schallquelle vom Kopfe lassen sich, von sonstigen Einzelheiten abgesehen, zwei Gruppen von Fällen, nämlich intracranielle und extracranielle Lokalisation, unterscheiden. Der Ton einer vor der Nase in der Luft klingenden Gabel wird nie ins Innere des Schädels verlegt. Steckt man aber die beiden Enden eines Kautschukschlauches in die Ohren und setzt auf die Mitte desselben eine sehr stark tönende Gabel, so hört man sie median im Kopfe, und zwar meist im Hinterhaupt. Dasselbe Resultat erhält man, wenn man zwei durchaus conform schwingende Telephone fest an die Ohrmuscheln preßt [1]). In einer Reihe speziell diesen Unterschied zwischen intra- und extracranieller Lokalisation betreffender Beobachtungen konnte ich [2]) feststellen, daß der scheinbar einfache und mediane Ursprungsort des Doppelschalles dem Kopfe um so näher liegt, je näher die Schallquellen, einzeln vernommen, geschätzt werden, und daß er in den Kopf hineinrückt, sobald man jede der beiden Schallquellen, für sich geprüft, direkt im Ohr ihrer Seite hört.

Ein von rechts kommender Schall wird von normal Hörenden niemals nach links verlegt und umgekehrt; wohl aber finden auch hier Verwechselungen zwischen Oben, Unten, Vorn und Hinten statt, wobei, wahrscheinlich im Zusammenhang mit Form und Lage der Ohrmuschel, im allgemeinen eine Tendenz zu bestehen scheint, die Richtungen Oben und Vorn-Oben zu bevor-

[1]) Ähnliche Versuche sind zuerst von Purkyně (Ber. d. Kgl. Böhm. Gesellsch. d. Wiss. z. Prag, 1860) angestellt. Urbantschitsch (Pflügers Arch. **24**, 579 ff., 1881) fand später, daß der Schall statt ins Hinterhaupt auch öfter in die Stirn oder an zwei symmetrische Punkte seitlich von der Mittelebene verlegt wird. — [2]) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **1**, 300 ff., 1890.

zugen. Die Unterscheidung von Rechts und Links ist stets richtig, weil wir hinreichend empfindlich sind, um zu unterscheiden, daß das eine Ohr stärker erregt wird als das andere; dem ersteren liegt erfahrungsmäßig die Schallquelle näher. Die Intensitätsunterschiedsempfindlichkeit an sich zeigt uns freilich nur an, daß eines der Ohren überwiegend gereizt wird. Die Erkenntnis, um welches von beiden es sich dabei handelt, knüpft sich jedenfalls an eine Art von Lokalzeichen, welches als eine für das rechte und linke Ohr verschiedene Qualität zu den übrigen Qualitäten des Schallreizes auf dessen Wege längs der nervösen Hörbahn hinzutritt [1]). Ob für die Unterscheidung der Richtungen Oben, Unten, Vorn, Hinten besondere physiologische Einrichtungen existieren, oder ob die hierauf bezüglichen Urteile sich nur auf mittelbare Kriterien stützen, ist noch unsicher, das letztere aber wahrscheinlicher. Die im verflossenen Jahrhundert mehrfach, zuletzt von Preyer [2]) und in anderer Form von Münsterberg [3]) vertretene Auffassung, die Bogengänge ständen mit der Schalllokalisation in Beziehung, haben sich wenigstens nicht als stichhaltig erwiesen [4]).

Die Beurteilung der Entfernung einer Schallquelle ist noch schwerer und unsicherer als diejenige der Richtung. Hier spielen Unterschiede der Stärke und Klangfarbe offenbar eine gewisse Rolle, wenn auch keineswegs immer eine Intensitätsverminderung als eine Vergrößerung oder eine Intensitätssteigerung als Verkleinerung des Abstandes aufgefaßt wird. Es fehlt noch sehr an genaueren Untersuchungen.

VI. Von den Geräuschen.

a) Physikalisches und Physiologisches.

Eine präzise psychophysiologische Definition des Begriffes Geräusch zu geben, ist nicht ganz leicht. Im gewöhnlichen Sprachgebrauch pflegt man als Geräusch im allgemeinen einen solchen Schalleindruck zu bezeichnen, dem weder das Einheitliche, Klare, Glatte, Andauernde eines einfachen Tones, noch das Melodische, Harmonische, Rhythmische einer musikalischen Klangmasse eigen ist. Indessen bestehen doch zwischen Geräuschen und Tönen verwandtschaftliche Beziehungen in der Empfindung. Den Geräuschen kommen ebenso wie den Tönen Unterschiede hinsichtlich der Dauer, der Stärke, der Gleichmäßigkeit und vor allen Dingen der Höhe zu. Die Sprache bringt letzteres onomatopoetisch dadurch zum Ausdruck, daß in der Benennung eines Geräusches als charakteristischer Vokal ein um so dunklerer gewählt wird, je tiefer das Geräusch, ein um so hellerer, je höher es ist. Eine von der Tiefe zur Höhe fortschreitende Reihe von Geräuschen wird z. B. gekennzeichnet durch die Wörter: Brummen, Murmeln, Schnurren, Knurren, Poltern, Rollen, Sausen, Rauschen, Hauchen, Rasseln, Knarren, Klappern, Knattern, Schmettern, Wehen, Kreischen, Knistern, Klirren, Ticken, Knipsen, Zischen, Zwitschern.

Daß man den Geräuschen eine mehr oder weniger bestimmte Tonhöhe zuschreibt, hängt mindestens zum Teil damit zusammen, daß die meisten,

[1]) Vgl. Stumpf, Tonpsychol. 2, 52 ff., 1890. — [2]) Pflügers Arch. 40, 586, 1887. — [3]) Beiträge z. experim. Psychol. 2 (1889). — [4]) Vgl. v. Kries, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 1, 235, 1890.

wenn nicht alle, einen oder mehrere Töne enthalten. Handelt es sich um ein nicht zu leises und zu kurzes Geräusch, so wird man oft genug ohne Mühe solche Töne heraushören. In anderen Fällen ist die Analyse nicht selten sehr schwierig. Stumpf, welcher in seiner Tonpsychologie [1]) den Geräuschen ein besonderes Kapitel gewidmet hat, berichtet, er habe einmal im Plätschern eines Gebirgsbachs besonders scharf und beständig *fis*^{1} gehört, immer umspielt von benachbarten Tönen; dazu ein Glucksen und Gurgeln, aus momentanen tieferen Tönen bestehend, und außerdem noch das eigentliche, gar nicht analysierbare Rauschen. Subjektive Geräusche scheinen ihm weniger deutlich Töne zu enthalten als objektive. Wenigstens konnte er in einem anhaltenden Geräusche dieser Art während einer Entzündung des Mittelohres bloß zuweilen mit einiger Bestimmtheit einen Ton (*gis*^{2}) entdecken und im übrigen höchstens verschiedene Töne, alle jenseits c^2, zu hören glauben; der Schalleindruck war eigentlich fast rein geräuschartig. Nach meinen Erfahrungen kann man sich durch Übung bis zu einem gewissen Grade im Heraushören von Tönen aus Geräuschen vervollkommnen. Ein äußerliches Hilfsmittel besteht darin, mehrere Geräusche ähnlicher Art rasch aufeinander folgen zu lassen. So kann man, wenn man eine Anzahl entsprechend abgestimmter hölzerner Klangstäbe der Reihe nach auf einen Tisch wirft, deutlich die Tonleiter hören, während die Töne der einzelnen Hölzer nur mühsam wahrzunehmen sind [2]).

Um also das Wesen irgend eines Geräusches und der zugehörigen Empfindung zu ergründen, wird man zunächst die darin enthaltenen einfachen Töne analytisch abzuscheiden, ihre Höhe, Stärke und Dauer zu bestimmen und schließlich den rein geräuschigen Rest weiter zu prüfen haben — falls nämlich dann ein solcher übrig bleiben sollte. Indessen sind wir mit unseren gegenwärtigen Kenntnissen und Methoden noch nicht entfernt in der Lage, alle Geräusche in solcher Vollständigkeit zu zerlegen. Findet die physikalische und physiologische Analyse schon den Klängen gegenüber Schwierigkeiten und Grenzen, so gilt dies in noch höherem Grade von den Geräuschen.

Um Aufklärung über die physikalische Beschaffenheit wenigstens einiger derselben zu erhalten, hat man versucht, die zugrunde liegende Luftbewegung sichtbar zu machen. So stellte Töpler [3]) mit seinem Schlierenapparat Untersuchungen über den elektrischen Funken an, denen zufolge dieser nur eine einzige Luftwelle erzeugen soll, ein Ergebnis, das von verschiedenen späteren Autoren ernstlich in Zweifel gezogen ist. Hensen [4]) beobachtete durch Knall verursachte Lufterschütterungen mittels einer Koenigschen manometrischen Flamme, wobei eine nicht sehr stark gedämpfte, schwach gespannte Kautschukmembran verwendet wurde. Dieselbe reagierte immer mit mehreren, oft bis zu 10, Schwingungen, und eine ähnliche Bewegung knüpfte sich an die Laute *p*, *b*, *k*, *t*. Brucke [5]) wandte gegen die Versuche mit Kautschukmembranen ein, daß die letzteren störende

[1]) 2, 497 ff., 1890. — [2]) Vgl. auch R. Koenig, Wiedemanns Ann. **14**, 375, 1881. — [3]) Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode, Bonn 1864. Über neuere Versuche in dieser Richtung vgl. Fortschritte d. Physik, Jahrgang 1899 u. f. — [4]) Hermanns Handbuch d. Physiol. **3** (2), 19, 1880. — [5]) Sitzungsber. d. Wiener Akad. **90** (3), Oktober 1884.

Nachschwingungen machten, und benutzte statt ihrer eine gedämpfte Glimmerplatte. Auf diese Weise erhielt er beim Händeklatschen und beim Explodieren von Seifenblasen, die mit einem Luft-Wasserstoff-Gemenge gefüllt waren, in der Regel nur eine Zacke. Beim Herausschießen von Pfropfen aus Bleiröhren ergaben sich dagegen stets mehrere Zacken; hierbei hatte das Geräusch auch einen mit der Länge der Röhre an Tiefe zunehmenden Beiklang, welcher sich aus stehenden Luftschwingungen in der wie ein angeblasener Resonator wirkenden Röhre erklärte. Gegen die Brückeschen Versuche kann man wieder geltend machen, daß die Glimmerplatte möglicherweise schwächere Wellenbewegungen wegen ihrer Beschaffenheit nicht oder nicht kräftig genug zur Darstellung bringt. Im ganzen ist also die optische Methode der Geräuschanalyse als ziemlich unvollkommen zu bezeichnen. Insbesondere ist es zurzeit noch fraglich, ob es wirklich irgend einen Knall gibt, dem nur eine einzige Luftwelle zugrunde liegt. Wenn Hensen und Schmidekam[1]) darauf hinweisen, daß schon die möglichst einfache Bewegung des Trommelfelles, welche entsteht, wenn man dasselbe mit einer Sonde berührt oder wenn man die Sonde zurückzieht, eine Knallempfindung liefert, so ist dem gegenüber daran zu erinnern, daß auch bei diesem Versuch Nachschwingungen der Luft im Gehörgang zum mindesten nicht ausgeschlossen sind.

Auch das Verfahren, die in einem Geräusche enthaltenen Töne durch Resonanz nachzuweisen, ist mehrfach angewendet. Hensen[2]) benutzte das Fortepiano zur Analyse des Händeklatschens. Bald hier, bald dort „regte sich eine Anzahl Saiten", und das Instrument „gab eine weit bestimmtere Antwort über den Wechsel der Knallhöhe als es das Ohr direkt vermochte".

Ähnliche Beobachtungen kann man übrigens mit beliebigen nicht zu leisen Geräuschen in der Nähe des Klavieres anstellen. Mach[3]) untersuchte speziell die Geräusche explodierender Knallgasblasen auf diese Weise und fand, daß große vorzugsweise die tiefen, kleine die hohen Saiten zum Mitschwingen bringen. Einer systematischen Analyse aller möglichen Geräusche steht freilich die Schwierigkeit entgegen, daß dazu sehr viele Saiten oder Resonatoren nötig sind und daß beide Hilfsmittel versagen, wenn die Stärke der betreffenden Teiltöne ein bestimmtes Minimum nicht überschreitet. Überdies ist hier wohl der Ort, eine gewisse Vorsicht bei der Verwendung von Resonanzmitteln gegenüber solchen Geräuschen zu empfehlen, welche mit verhältnismäßig starken Erschütterungen oder Luftströmungen verbunden sind. Gut gearbeitete Stimmgabeln auf Resonanzkasten sind derart empfindlich, daß sie schon durch leises Anstoßen oder schwaches Anblasen zum Tönen gebracht werden und so gelegentlich die Existenz eines faktisch in dem zu prüfenden Geräusch gar nicht enthaltenen Tones vortäuschen können. Von Saiten dürfte Analoges gelten. Kommt doch die Äolsharfe offenbar nicht dadurch zum Klingen, daß sie auf Töne im Winde resoniert, sondern weil der Luftstrom die Saiten ähnlich wie der Violinbogen aus ihrer Gleichgewichtslage bringt. Was schließlich die Resonatoren anlangt, so ist bekannt, daß schon ein leises Hinwegblasen über die Schallöffnung dieselben zum Tönen veranlaßt.

---

[1]) Arbeiten d. Kieler Physiol. Inst. 1868, S. 49. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **23**, 80, 1886. — [3]) Analyse der Empfindungen usw. (2), Jena 1900, S. 173.

Ein Beobachter, welcher ein scharfes und geübtes Ohr besitzt, verfügt damit über ein ganz vortreffliches Mittel zur Geräuschanalyse, aber für alle Fälle reicht es doch auch nicht aus. Diejenigen Teiltöne eines Geräusches, welche, absolut genommen, unter der Schwelle bleiben, kommen freilich überhaupt nicht für das Geräusch als physiologische Erscheinung in Betracht. Dafür wird es indes bei Geräuschen sehr viel öfter als bei musikalischen Klängen vorkommen, daß einzelne darin enthaltene Töne neben der gesamten Schallmasse relativ unterschwellig sind, oder eine sehr kurze Dauer haben, oder hinsichtlich der Tonhöhe sehr nahe zusammen liegen. Alle diese Momente bilden aber, wie früher schon ausführlicher erörtert worden ist, beträchtliche und unter Umständen unüberwindliche Hindernisse der physiologischen Schallzerlegung.

Immerhin verdanken wir dem physiologischen Experiment das Wichtigste von dem, was wir bis jetzt über die Beziehungen zwischen Tonempfindungen und Geräuschempfindungen wissen.

Zunächst steht fest, daß ein allmählicher Übergang zwischen Ton und Geräusch möglich ist, insofern ein Ton bei exzessiver Verkürzung seiner Dauer zuletzt, für den einen Hörer eher als für den anderen, einen geräuschartigen Charakter annimmt, wovon bereits in dem Abschnitt über die kürzesten Töne die Rede war. So hat Mach[1]) es ja direkt ausgesprochen, daß das c^0 „zu einem kurzen, trockenen Schlag oder schwachen Knall von sehr undeutlicher Tonhöhe zusammenschrumpfe", wenn die Zahl der Schwingungen auf zwei bis drei reduziert würde. Dennert[2]) gibt an, daß das Anschlagen eines auf c^4 abgestimmten Pappresonators mit einem Hämmerchen den Ton sehr ähnlich dem Uhrticken erscheinen läßt und daß der Klang, den ein zwischen die Zähne geklemmtes, dünnes, schmales Holzstäbchen hervorruft, wenn es angestoßen wird, mit zunehmender Verkürzung des Stäbchens sich erst successive erhöht, dann in ein tickendes und zuletzt in ein knipsendes Geräusch übergeht. Versuche mit dem gleichen Resultat der Verwandlung eines Tones in ein Geräusch hat Kessel[3]) mit Pfeifen ausgeführt. Man kann dazu aber auch Glocken oder Weingläser benutzen, indem man sie anfänglich frei aufgehängt und darauf bei wachsender durch Auflegen der Finger bewirkter Dämpfung anschlägt.

Wie schon Helmholtz in seiner Lehre von den Tonempfindungen angegeben hat, kann man anderseits ein Geräusch aus Tönen kombinieren, wenn man hierzu nahe benachbarte wählt, z. B. sämtliche Tasten des Klaviers in der Breite von einer oder zwei Oktaven zugleich anschlägt. Der geräuschartige Charakter wird in diesem Falle wohl durch das Zusammenwirken der Dissonanz, der Unanalysierbarkeit und des wirren Durcheinanderwogens der Schwebungen bedingt. Stumpf[4]) erklärt, daß der Versuch nur in der tiefen Region wirklich zu einem beinahe reinen Geräusche führe; in den mittleren Oktaven bleibe der Eindruck im wesentlichen ein Klang, aus dem auch eine größere oder geringere Anzahl Teiltöne herauszuhören sei. Danach scheint es fast, als ob ein Geräusch um so eher als Klang beurteilt würde, je mehr dem Beobachter durch Übung oder andere Umstände die

[1]) Lotos, Aug. 1873. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **29**, 82, 1890 und **41**, 111, 1896. — [3]) Arch. f. Ohrenheilk. **18**, 138, 1882. — [4]) Tonpsychologie **2**, 504 ff., 1890.

Zerlegung in Teiltöne erleichtert ist, und als ob ein und dasselbe Geräusch für verschiedene Hörer einen verschieden hohen Grad von Geräuschigkeit im Gegensatz zum Klange besitzen könne.

Ein Geräusch kann auch entstehen, wenn eine Anzahl Töne von verschiedener Höhe sehr schnell aufeinander folgen. Allerdings darf die Succession nicht durchweg in derselben Richtung verlaufen. „Wir können", sagt Stumpf hiervon mit Recht, „den schnellsten Wechsel von Tönen herstellen, wenn wir mit dem Finger über die Tasten streichen (gute Dämpfung des Klaviers vorausgesetzt) oder auf einer Violinsaite stetig hinaufrutschen oder den eine gedackte Pfeife verschließenden Pfropfen hin und her schieben ... aber wir hören kein Geräusch, sondern eben eine rasche Tonveränderung." Indessen verhält sich die Sache anders, wenn höhere und tiefere Töne in buntem Durcheinander abwechseln. Versuche dieser Art kann man freilich am Klavier nicht gut anstellen, wohl aber mit Hilfe einer Seebeckschen Sirenenscheibe. Konstruiert man nämlich den Löcherkreis einer solchen derart, daß die Entfernungen sämtlicher Öffnungen voneinander verschieden, und zwar regellos bald größer, bald kleiner sind, so geben je zwei aufeinander folgende Löcher beim Anblasen während der Rotation einen äußerst kurzen Ton, und alle diese Töne sind ungleich hoch. Als Gesamteindruck resultiert ein Schall, der mit der Umdrehungsgeschwindigkeit an Höhe zu- oder abnimmt, im übrigen aber vollständig den Charakter eines Geräusches hat. Oder man verfährt so, daß man den Löcherkreis aus diversen Gruppen von mehr als zwei Öffnungen zusammensetzt und den Löchern innerhalb der einzelnen Gruppe den gleichen, aber für jede Gruppe einen anderen Abstand erteilt. Auch diese Anordnung ergibt für das Ohr ein Geräusch, das physikalisch aus kurzen, rasch einander folgenden Tönen von wechselnder Höhe besteht. Beide Formen des Experimentes sind bereits von Dennert[1]) ausgeführt und ich kann die Richtigkeit der Beobachtung nur bestätigen.

Aus dem Mitgeteilten geht hervor, daß Geräuschempfindungen möglich sind, die sich aus Tonempfindungen zusammensetzen, allerdings in einer Weise, welche bei musikalischen Klängen im allgemeinen nicht recht vorzukommen pflegt, insofern es sich eben um Töne von großer Kürze, irregulärem, schnellem Wechsel der Tonhöhe, sehr geringem Unterschiede der Schwingungszahlen bei großer Menge handelt. Wenn wir daher bei der Untersuchung irgend eines Geräusches nach der analytischen Abscheidung aller deutlich darin enthaltenen Töne einen rein geräuschhaften, nicht weiter analysierbaren Rest übrig behalten, so kann derselbe sehr wohl noch eine Kombination aus Tönen von der eben erwähnten Art sein.

Es liegt also, wenigstens bei dem gegenwärtigen Stande unseres Wissens, kein zwingender Grund vor, die Existenz von Geräuschen, welche mit Tönen nichts zu tun haben und ein akustisches Phänomen von eigener Art sind, anzunehmen. Wohl aber läßt sich vom Standpunkte der Helmholtzschen Resonanztheorie aus ein Argument dagegen anführen, nämlich dieses, daß für die Perzeption der Geräusche, falls dieselben eine spezifische Klasse von Sinnesempfindungen wären, auch ein besonderes Organ vorhanden sein müßte, was aber nicht der Fall ist. Das Cortische Organ in der Schnecke wird ja

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. 24, 184, 1887.

von der Resonanzhypothese gänzlich für die Töne in Anspruch genommen, und die Endorgane des *Nervus acusticus* in den Otolithenorganen und den Ampullen der Bogengänge dienen nach der Anschauung der meisten Physiologen der Gegenwart zur Wahrnehmung von Lage- und Bewegungsempfindungen.

Helmholtz selbst hat in den früheren Ausgaben seiner Lehre von den Tonempfindungen die Vermutung ausgesprochen, daß die zur Resonanz anscheinend wenig zweckmäßigen Hörhärchen in den Ampullen der Bogengänge und den Säckchen vorzugsweise bei der Perzeption der Geräusche beteiligt sein möchten. Später trat er der Auffassung bei, daß die Ampullenhärchen uns die Empfindung der drehenden Bewegungen des Kopfes vermitteln, ist aber dabei geblieben, daß die Hörhärchen der Otolithensäckchen zur Aufnahme der quiekenden, zischenden, schrillenden, knipsenden Hörempfindungen geeignet seien und die Art ihrer Reaktion nur gradweise von der der Schneckenfasern verschieden wäre. Exner[1]) verlegt die Empfindung der Geräusche ausschließlich in die Schnecke. Die Nerven des Cortischen Organes erfahren nach ihm nicht nur dann eine Erregung, wenn die Schwingungen der zugehörigen Fasern in der Basilarmembran eine gewisse Elongation erreicht haben, sondern auch dann, wenn die Bewegung der Schneckenfasern selbst bei geringem Ausschlag sehr schnell erfolgt ist. „Während die Empfindung des Tones entsteht, indem wenige Fasern in relativ langsames Mitschwingen geraten, entsteht die Empfindung des objektiven Geräusches, indem sämtliche Fasern der *Membrana basilaris* mit relativ großer Geschwindigkeit aus ihrer Lage geschnellt werden." Brücke hat sich in der oben erwähnten Abhandlung der Auffassung Exners im wesentlichen angeschlossen. Bezüglich der Momentangeräusche, der Explosionen und Schläge kam er zu dem Resultat, daß sie die tonhörenden Nerven zu erregen vermöchten, und die kontinuierlichen Geräusche des Zischens, Wehens, Rauschens hält er für nicht prinzipiell verschieden von den erstgenannten. Denn im Rauschen des Meeres wie des Windes kämen viele kleine, unter günstigen Umständen einzeln hörbare Explosivgeräusche und Schläge vor; daneben enthalte das Rauschen offenbar noch Reibungsgeräusche, die sich zu den Tonwellen verhielten wie die unregelmäßigen Kräuselungen einer Wasseroberfläche zu gleichmäßig fortschreitenden Wogen. Das Zischen unterscheide sich vom Rauschen hauptsächlich durch die Höhe der Einzelgeräusche und die Schnelligkeit ihrer Aufeinanderfolge. Das Hauchen und Wehen repräsentiere die schwächsten durch Reibung verursachten unregelmäßigen Luftbewegungen, welche noch durch das Gehör wahrgenommen würden. Auch Mach[2]) steht auf dem Standpunkte, daß das Geräusch eine Kombination von Tönen ist, „deren Zahl, Höhe und Intensität mit der Zeit variiert", und weist zur Begründung dieser Ansicht namentlich auf den stetigen Übergang hin, der zwischen Tönen und Geräuschen möglich ist.

Dahingegen tritt Stumpf in der Tonpsychologie für die Existenz reiner Geräusche als einer eigenen Klasse von Empfindungen und für ein speziell Geräusche perzipierendes Sinnesorgan im Ohre ein. Er hebt an mehreren Stellen des Werkes besonders hervor, daß ihm die Schwebungen zu dem

---

[1]) Pflügers Arch. 13, 228, 1876. — [2]) Analyse der Empfindungen (2), 172 ff., 1900.

Gesamteindruck des Klanges noch Geräusche hinzuzubringen schienen. Entscheidende Beobachtungen über diesen interessanten Punkt liegen allerdings bis jetzt weder von seiten Stumpfs noch von seiten eines anderen Forschers vor, und ich für meine Person möchte vorläufig glauben, daß der geräuschige Charakter der Schwebungen durch die Unanalysierbarkeit des Komplexes der vielen wenig verschiedenen Tonempfindungen und durch die an manche bekannte Geräusche erinnernde rauhe oder rollende Unstetigkeit des Ganzen hinreichend erklärt sei. Brächte der schwebende Zusammenklang zweier Töne als Nebeneffekt noch ein Geräusch durch Erregung eines gesonderten Geräuschempfindungsapparates zustande, so dürfte man wohl erwarten, gelegentlich einem Ohrenkranken zu begegnen, der entweder nur den Klang oder nur das Geräusch bzw. wenigstens eines von beiden überwiegend deutlich hört. Dennert[1]) hat hierauf in seiner ohrenärztlichen Praxis besonders geachtet, aber niemals etwas derartiges beobachtet.

Überhaupt gehört Dennert zu denjenigen Autoren, welche keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Klängen und Geräuschen anerkennen und keine getrennten Perzeptionsorgane für beide Schallarten annehmen. Er[2]) erklärt die häufig zugunsten eines spezifischen Geräuschapparates ins Feld geführte Beobachtung, daß Personen mit sehr herabgesetztem Hörvermögen bisweilen noch einzelne Geräusche, wie Ticken, Knipsen, Klopfen, leidlich hören, mit dem verschiedenen Grade des Ergriffenseins der Teile des Gehörorgans, welche die Wahrnehmung hoher und tiefer Töne vermitteln. Je nachdem hohe Töne relativ besser gehört werden als tiefe oder umgekehrt, können auch hohe oder tiefe Geräusche noch verhältnismäßig gut perzipiert werden, während das Hörvermögen im ganzen herabgesetzt ist. In vielen Fällen werden auch einzelne Laute des Alphabets oder einzelne Geräusche von solchen schwerhörigen Individuen noch relativ leicht vernommen, welche im allgemeinen ein schlechtes Sprachgehör besitzen. Die bevorzugten Laute sind dann nach Dennert solche, deren charakteristische Teiltöne hinreichend lange auf das Ohr einwirken, während mit der Verkürzung der Tondauer die Perzeptionsfähigkeit um so rascher abnimmt, je weiter die Schwerhörigkeit vorgeschritten ist.

Schwendt und Wagner haben bei ihren „Untersuchungen von Taubstummen“ [3]) auch Hörprüfungen mit Geräuschen vorgenommen. In Berücksichtigung des Umstandes, daß die echten Taubstummen sehr intensive Geräusche, wie Donnern, Schießen und auch wohl zuweilen Händeklatschen, im Trommelfell fühlen oder als Erschütterungen des Bodens wahrnehmen, verwendeten sie als Schallquelle die Taschenuhr, den Hörmesser von Politzer, das Blasen des Galtonpfeifenballons, das Streichen des Violinbogens auf Stimmgabeln, das Klopfen gegen die Koenigschen Klangstäbe, das Cri-cri, gesprochene Konsonanten, Nägelknipsen und Fingerschnalzen. Das Gesamtresultat der ihrer Natur nach freilich ziemlich unvollkommenen Versuche war, daß diejenigen Patienten, welche keine Töne hörten, für Geräusche ebenfalls taub waren, weshalb denn auch diese beiden Beobachter die Geräuschperzeption in die Schnecke verlegt wissen möchten.

---

[1]) Arch. f. Ohrenheilk. **29**, 72, 1890. — [2]) Ebenda **41**, 109 ff., 1896. — [3]) Basel 1899, S. 82 ff.

Steinbrügge[1]) hat über einen eigentümlichen Fall von Hysterie bei einem 45jährigen Landmanne berichtet, welcher regelmäßig Krampfanfälle bekam, wenn er Instrumentalmusik oder auch nur das Blasen auf einer Kindertrompete hörte, während er gegen Geräusche, Knallerschütterungen, Trommeln, Straßen- und Eisenbahnlärm ganz unempfindlich war. Der Autor bezeichnet selbst diesen Fall ausdrücklich als ein seltenes und für die Frage nach den Beziehungen zwischen Tönen und Geräuschen wichtiges Naturexperiment. Um so mehr ist die Mangelhaftigkeit der psychophysischen Untersuchung des später geheilten Kranken zu bedauern. Dieselbe beschränkte sich auf die Prüfung mit einer Stimmgabel, deren Ton einen Anfall auslöste, und mit dem Geräusch eines Induktionsapparates, das keine Reaktion hervorrief. Nicht einmal der so einfach anzustellende Versuch über die Wirkung des beim gleichzeitigen Niederdrücken vieler benachbarter Tasten des Klaviers entstehenden Geräusches ist gemacht worden. Unter diesen Umständen läßt sich der Fall in keiner Weise physiologisch für die Lehre von den Geräuschen verwerten. Aus seiner Beschreibung muß man schließen, daß die in jedem Geräusche, auch in dem der Feder eines Induktoriums, bald mehr bald weniger zahlreich enthaltenen deutlichen Töne keinen Krampf zuwege brachten. Alsdann aber ist es nicht weiter verwunderlich, daß auch die weniger deutlichen Teiltöne es nicht taten, und das Krankheitsbild bleibt mit jener Anschauung, wonach die eigentlichen Geräusche aus lauter unanalysierbaren Tönen bestehen, ebensogut vereinbar wie mit der gegenteiligen.

b) Psychophysisches.

Wie schon bei der Besprechung der Hörprüfungsmethoden erwähnt ist, hat man zur Bestimmung der Hörschwelle ebenso wie zu den Beobachtungen über die Unterschiedsempfindlichkeit für Schallstärken immer mit Vorliebe Geräusche benutzt, weil mit ihnen in verschiedenen Beziehungen bequemer zu operieren ist, wenn sie auch sonst wegen ihrer komplizierten Zusammensetzung und qualitativen Unkontrollierbarkeit keine idealen Untersuchungsmittel sind. Der Versuchsmodus ist im Prinzip sehr einfach. Man läßt entweder eine Kugel aus genau bestimmbarer Höhe auf eine horizontale Platte oder ein Pendel längs einer zur Bestimmung des Fallwinkels dienenden Gradteilung gegen einen festen Klotz fallen. Der erste, welcher ein Schallpendel konstruierte, dürfte Wolke[2]) gewesen sein. Sein Apparat bestand aus einem Schallbrett von Tannenholz, auf das ein eichener Schlägel (an einem Gradbogen entlang) fiel. Itard[3]) benutzte später als Akumeter einen frei hängenden Kupferring, gegen den ein Stäbchen mit einer Kugel am Ende schlug.

Schafhäutl[4]) ließ exakt gewogene Kugeln aus Kork, Elfenbein oder Blei auf den Mittelpunkt einer Glasplatte fallen, welcher vom Ohre 91 mm entfernt war. Er fand dabei, daß der Schall einer aus 1 mm Höhe fallenden Korkkugel von 1 mg Gewicht für ihn bei voller Ruhe der Umgebung

[1]) Zeitschr. f. Ohrenheilk. **19**, 328, 1889. — [2]) Nachricht von den zu Jever durch die Galvani-Voltasche Gehörgebekunst beglückten Taubstummen. Oldenburg 1802. — [3]) Traité des maladies de l'oreille et l'audition, Paris 1821 u. 1842. — [4]) Abhandl. d. math.-physikal. Kl. d. Münchener Akad. d. Wiss. **7**, 501, 1855.

25 mal von 30 Versuchen mit aller Sicherheit noch hörbar war. Ein ähnliches Resultat erhielt er mit anderen jüngeren Beobachtern; für ältere war das Geräusch meist schon unterschwellig. Nörr[1]) bediente sich zu seinen Versuchen über das Unterscheidungsvermögen für Schallstärken bleierner Kugeln von sehr verschiedenem Kaliber und einer unmittelbar auf einem Tisch liegenden Eisenplatte. Die Schwellenintensität lieferte für sein Ohr ein Gewicht von 6,7 mg bei einer Fallhohe von 1,2 bis 2,2 mm und einer Distanz des Ohres gleich 50 cm. Andere Autoren haben als Fallkörper Wassertropfen verwendet; so Lewy[2]), der 1 dg schwere Tropfen auf eine Blechplatte mit Filzunterlage fallen ließ. Nach dem mir allein zugänglichen, leider allzu kurzen Bericht des Archivs für Ohrenheilkunde fand Lewy als Resultat von 6000 Beobachtungen, daß das Ohr bis zum 15. Lebensjahr den Schall eben noch bei einer Fallhöhe von 50 bis 60 mm vernimmt, während der Erwachsene dazu eines Fallraumes von 60 bis 80 mm und der Greis eines solchen von 100 bis 120 mm bedarf, immer den nämlichen Abstand des Ohres von der Schallquelle gleich 25 cm vorausgesetzt.

Diese Angaben lassen sich nicht direkt miteinander vergleichen. Denn einerseits ist die Distanz zwischen Ohr und Platte von den einzelnen Autoren verschieden gewählt und das Gesetz von der Abnahme des Schalles mit der Entfernung gerade für Bedingungen wie die hier vorliegenden noch nicht sicher genug erkannt; anderseits besitzen wir noch kein eindeutiges und einwandfreies Maß für die Intensität eines durch den Fall einer Kugel auf eine Platte erzeugten Schalles. Die lebendige Kraft, mit der die Kugel auftrifft, ist proportional dem Produkt $m.h$ bzw. mv^2, wenn h die Fallhöhe ist und v die Geschwindigkeit, mit welcher die Kugel auf der Platte anlangt. Wird nun die lebendige Kraft vollständig an die Platte und durch deren Schwingungen wieder an die Luft abgegeben, so wird man die Schallintensität proportional mh oder mv^2 setzen können. Es ist aber keineswegs an sich selbstverständlich, daß es sich so verhält. Ein Teil der Kraft kann außer in Schallschwingungen noch in andere Bewegungsformen übergehen, worunter die bleibende Deformation der Kugel und der Platte eine wichtige Rolle spielt, und nur wenn diese Energieverluste sehr geringe sind, wird in Wirklichkeit Proportionalität mit $m.h$ zu erwarten sein. Dieselbe ist in der Tat innerhalb der anzuwendenden Grenzen von Starke[3]), einem Schüler Wundts, annähernd bestätigt. Zu einem anderen Resultat ist dagegen, wie schon früher erwähnt, K. v. Vierordt[4]) gelangt. Er fand in seinen Beobachtungen, daß zwei Schalle gleich stark gehört wurden, wenn die Produkte aus Gewicht und Geschwindigkeit (oder Quadratwurzel der Fallhöhe) gleich waren, und stellte daher als Schallmaß die Größe $p.h^\varepsilon$ auf, worin ε nach seinen und Oberbecks[5]) genaueren Versuchen annähernd gleich 0,6 zu setzen ist. Ein zweiter Schüler Wundts, E. Tischer[6]), kam zu dem Ergebnis, daß ε auch mit Fallhöhe und Gewicht stark variiere und daß ein allgemeines Maß für Schallstärken gar nicht zu formulieren sei; man

[1]) Zeitschr. f. Biol. **15**, 297 ff., 1879. — [2]) Arch. f. Ohrenheilk. **37**, 269, 1894. — [3]) Philos. Stud. **3**, 264 ff., 1886. — [4]) Die Schall- und Tonstärke und das Schallleitungsvermögen der Körper, Tübingen 1885. Vgl. W. Preyer, Wissensch. Briefe v. G. Th. Fechner u. W. Preyer, Hamburg u. Leipzig 1890, S. 169 ff. — [5]) Wiedemanns Ann. **13**, 222, 1881. — [6]) Philos. Stud. **1**, 543, 1883. (Auch Leipziger Dissert. 1882.)

müsse es für jede einzelne Versuchsreihe besonders ermitteln. Ebenso ist Fechner[1]) der Ansicht, daß ε wesentlich von dem Material der Kugeln und der Platte abhängig sei. Mit Rücksicht auf diese Unsicherheit in der Messung der objektiven Schallstärke wird man die Angabe Schafhäutls, der Schwellenwert der Intensität betrage für sein Ohr 140,07 Milligrammmillimeter, und Nörrs Berechnung seiner Schwelle zu rund 1500 Milligrammmillimeter vorsichtig aufzunehmen haben.

Die einer exakten Messung der Schallstärke, mit welcher ein bestimmtes Geräusch unter bestimmten Umständen das Ohr erregt, entgegenstehenden Schwierigkeiten haben sich auch von jeher bei den Untersuchungen über die Unterschiedsempfindlichkeit für Geräuschintensitäten geltend gemacht und deren Ergebnisse zum Teil in Frage gestellt. So ist die von Renz und Wolf[2]), welche nach der Methode der richtigen und falschen Fälle arbeiteten, und von Volkmann[3]), der die Methode der Minimaländerungen wählte, übereinstimmend gemachte Angabe, zwei Schalle seien dann eben mit Sicherheit als verschieden laut zu erkennen, wenn ihre Intensitäten sich gerade wie 4 : 3 verhielten, unvereinbar mit Vierordts Behauptung, daß $\varepsilon = 0{,}6$ sei und die Schallstärke mit der ersten Potenz statt mit dem Quadrat der Entfernung abnehme. Die von den genannten Autoren gefundene Gültigkeit des Weberschen Gesetzes ist dagegen in der unter Vierordts Leitung verfaßten, oben schon angeführten, Abhandlung von Nörr bestätigt worden. Seitdem sind mehrere weitere Publikationen von Schülern Wundts erschienen[4]). Es ergaben darunter diejenigen Methoden, die auf der Vergleichung kleinster Unterschiede beruhen, in sehr weiten Grenzen ebenfalls eine Übereinstimmung mit dem Weberschen Gesetze, während bei den mittleren Abstufungen je nach dem Versuchsverfahren die Resultate zwischen der geometrischen und arithmetischen Teilung der zwischen den beiden Grenzreizen gelegenen Strecke schwankten.

---

[1]) Revision d. Hauptpunkte d. Psychophysik, Leipzig 1882, S. 375. — [2]) Arch. f. physiol. Heilkunde 1856, S. 185. — [3]) Vgl. Fechner, Elemente der Psychophysik 1, 176, 1859/60. — [4]) S. d. Nähere (namentlich in bezug auf die vervollkommnete Technik des Fallphonometers) bei Wundt, Grundzüge d. Physiol. Psychologie (5) 1, 509 ff., 1902.