

Zur Theorie der Differenzttöne und der Gehörsempfindungen überhaupt.

Von

MAX MEYER.

In meiner Abhandlung „Ueber Kombinationstöne“, *Zeitschr. f. Psychol.* Bd. XI, habe ich die wichtigsten bis dahin bekannten Thatsachen über Differenzttöne angeführt und die Möglichkeit einer Theorie dieser Thatsachen zu zeigen versucht. Da mir schon damals die Resonanzhypothese unzureichend erschien, so stellte ich mir die Aufgabe, darzulegen, wie aus einer mechanisch möglichen andersartigen Zerlegung der auf das Gehörorgan einwirkenden Klangwelle die wirklichen Erscheinungen erklärt werden können. Nur als eine Ergänzung zu meiner Theorie der Wellenzerlegung nahm ich dann auch noch Resonanzwirkung, doch in unvollkommenem Grade, an. Ich bin jetzt bei Fortführung dieser Untersuchungen dahin gelangt, die Resonanzhypothese gänzlich verwerfen zu müssen, da die Widersprüche, auf die man durch sie geführt wird, sich immer mehr häufen. Andererseits ist es mir gelungen, meinen theoretischen Prinzipien eine, wie mir scheint, sichere anatomische Grundlage zu geben und zugleich eine neue geometrische Darstellung zu finden, die den Vorzug hat, nicht nur — in ihren einzelnen Theilen wenigstens — ein Abbild der Klangwelle zu sein, sondern uns auch eine übersichtliche Anschauung zu gewähren von dem zeitlichen und örtlichen Verlaufe einer gewissen durch die Gehörknöchelchen auf das Gehörorgan übertragenen Bewegung.

Damit wir das Thatsachenmaterial nach Möglichkeit beisammen haben, will ich zunächst die Ergebnisse meiner früheren Abhandlung in kurzer Zusammenfassung wiedergeben und dann neue Beobachtungen anschliessen.

Die Differenztöne sind subjektiven Ursprungs¹, d. h. sie entstehen durch die eigenthümliche Funktion unseres Gehörorgans. Eine allgemein geltende Formel, aus der man für jeden Einzelfall ableiten könnte, welche Differenztöne entstehen müssen, giebt es nicht. Doch haben sich nach meinen Beobachtungen die folgenden Regeln als richtig erwiesen.

Bei Halbton- oder noch kleineren Intervallen entsteht einzig und allein der direkt der Differenz der Primärtöne entsprechende Differenzton, z. B. (in Verhältnisszahlen ausgedrückt) beim Intervall 19:20 der Ton 1.

Bei grösseren Intervallen bis zur Oktave hin, von denen die Voraussetzung erfüllt wird, dass ihre Verhältnisszahlen sich um eine Einheit unterscheiden, entstehen ausser 1, der am stärksten auftritt, noch einige derjenigen Töne, die den in der absteigenden Zahlenreihe auf die Primärtöne zunächst folgenden Zahlen entsprechen, z. B. beim Intervall 8:9 ausser 1 noch 7, 6 und 5, bei 6:7 ausser 1 die Töne 5 und 4; unterscheiden sich die Primärtöne um mehr als eine Einheit, so entstehen die Differenztöne $h-t$, $2t-h$ und $2h-3t$, wobei h die Schwingungszahl des höheren, t die des tieferen Tones darstellt. Der stärkste von diesen drei Tönen ist bei Intervallen, die kleiner sind als die Quinte, der Ton $h-t$, bei den Intervallen zwischen Quinte und Oktave der Ton $2t-h$; z. B. ist beim Intervall der kleinen Sexte — 5:8 — der stärkste Differenzton 2, die beiden andern sind 3 und 1. Für ein starkes Auftreten des Differenztones $2t-h$ ist in jedem Falle günstig ein Ueberwiegen der Stärke des tieferen Primärtones über die des höheren.

Bei Intervallen, die über die Oktave hinausgehen, entsteht derjenige Ton, dessen Verhältnisszahl gleich der kleinsten Differenz ist, die man erhält, wenn man h vom Doppelten oder Dreifachen von t (bezw. dieses von h) abzieht. So hört man beim Intervall 4:9 den Differenzton 1, da $9-2\cdot4=1$, bei 4:11 ebenfalls 1, da $3\cdot4-11=1$ ist.

¹ In gewissen Fällen vorkommende objektive Kombinationstöne interessieren uns hier nicht.

*) Diese Regeln beziehen sich zunächst nur auf einen Zusammenklang von zwei Tönen. Bei drei und mehr gleichzeitigen Primärtönen pflegen alle diejenigen Differenztöne hörbar zu werden, die man beim Zusammenklange von je zweien der Primärtöne beobachtet. Ausserdem treten dann gewöhnlich noch neue Differenztöne auf, die der Differenz der Verhältnisszahlen je zweier ursprünglichen, d. h. schon im Zweiklange zu Gehör kommenden (Primär- und Differenz-) Töne entsprechen. Doch darf man sich, wenn man vor Täuschungen bewahrt bleiben will, nie auf eine Regel verlassen, sondern muss durch Beobachtung feststellen, welche Differenztöne bei jedem einzelnen in Frage kommenden Mehrklange sich bemerkbar machen.

Sind die bezüglichen Differenzen klein, so hört man stets neben den Differenztönen (bei ganz kleinen Differenzen an ihrer Statt) die entsprechende Anzahl Schwebungen.

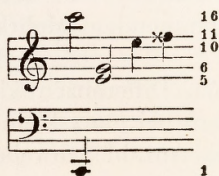
Neue Beobachtungen.

I. Ganz und gar zu verwerfen ist das Verfahren, einfach die Differenzen aller Paare von Schwingungszahlen zu bilden, die den in einem Mehrklange enthaltenen Tönen zukommen, und dann zu behaupten, alle diesen Differenzen entsprechenden Töne gelangten wirklich zur Empfindung. Dass dies auf ganz falsche Bahnen leitet, werde ich an zwei HELMHOLTZ' „Tonempfindungen“ entnommenen Beispielen zeigen. Als HELMHOLTZ seine „Lehre von den Tonempfindungen“ schrieb, war das über Differenztöne vorhandene Thatachenmaterial noch viel dürftiger als heutzutage. Nur so ist es erklärlich, dass er durch den Umstand, dass in gewissen, wenn auch seltenen Fällen objektive, durch physikalische Mittel nachweisbare Kombinationstöne¹ vorkommen, zu der Ansicht gebracht wurde, die allgemein in der mehrstimmigen Musik zu beobachtenden Differenztöne seien ebenfalls objektiven, physikalischen Ursprungs und durch eine

¹ Die objektiven Kombinationstöne sind theils höher, theils tiefer als die Primärtöne, während die subjektiven Differenztöne, wie schon ihr Name zum Ausdrucke bringt, stets tiefer sind.

mechanische Theorie ableitbar. Wäre nun selbst diese Voraussetzung richtig, so würde HELMHOLTZ' mathematische Deduktion doch noch an dem Mangel leiden, dass sie von ihm nur für den Zusammenklang von zwei Tönen wirklich durchgeführt ist; was in dem Falle eines Zusammenklanges von vier bis fünf Tönen geschehen muss, wie er — ganz abgesehen von den Obertönen — in der Musik häufig genug ist, wäre daraus nicht ohne weiteres zu ersehen.

Unter den Dur-Dreiklängen in verschiedenen Lagen finden wir bei HELMHOLTZ folgendes Beispiel:



Die Halbnote bezeichnen die Primärtöne, deren Verhältnisszahlen 5, 6, 16, die Viertelnoten die Differenztöne, deren Verhältnisszahlen $6 - 5 = 1$, $16 - 6 = 10$ und $16 - 5 = 11$ sind. Ich habe nun diesen Klang untersucht und festgestellt, dass zwar 1 sehr stark, von sonstigen Differenztönen aber, also auch von 10 und 11 keine Spur zu hören ist.¹ Dem Moll-Dreiklange in der einfachsten Lage, dessen Zahlenverhältniss 10 : 12 : 15 ist, weist HELMHOLTZ die Differenztöne $12 - 10 = 2$, $15 - 12 = 3$, $15 - 10 = 5$ zu. Eine sorgfältige Analyse, der ich diesen Dreiklang unterwarf, ergab Folgendes: Am stärksten von allen Differenztönen macht sich die Tonsumme $1 + 2$ geltend. Ich spreche hier von der Summe beider Töne, weil es wegen ihrer starken Verschmelzung äusserst schwer ist, über die Intensität eines einzelnen von beiden zu einem bestimmten Urtheile zu kommen. Recht stark ist ferner der Ton 7. Etwas schwächer treten die Töne 3, 5, 6 und 8 auf. Sehr schwach hörbar ist der Ton 9. Wir hören also bei diesem Moll-Dreiklange gleichzeitig die den Zahlen 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, (9), 10, 12, 15 entsprechenden Töne. Dass die Methode, die Differenztöne durch alle möglichen Subtraktionen

¹ Diese und die folgenden Beobachtungen beziehen sich stets, wenn nicht ausdrücklich anderes angegeben ist, auf Töne von Stimmgabeln auf Resonanzkästen.

zu bestimmen, völlig unbrauchbar ist, geht aus diesen Beispielen klar hervor; sie liefert bald zu viel, bald zu wenig, nur selten die richtigen Differenztöne.

II. Beim Intervall 5:8 ist, wie ich erwähnte, der Ton 2 im Allgemeinen der stärkste der drei Differenztöne. Dies trifft jedoch nur dann zu, wenn das Intervall ziemlich rein gestimmt ist. An Tönen der zweigestrichenen Oktave habe ich beobachtet, dass die Differenztöne 1 und 2 um so schwächer werden, je mehr das Intervall verstimmt wird. Bei einer Verstimmung des höheren Primärtones um etwa 8 Schwingungen ist der Ton $2t - h$ nur noch mit Mühe, $h - t$ dagegen sehr deutlich hörbar. Man sieht daran, wie wichtig es ist, sich bei Differenztonbeobachtungen stets zu versichern, dass das zu untersuchende Intervall auch ganz rein gestimmt ist, da man sich sonst leicht zu falschen Schlussfolgerungen verleiten lässt.

III. Eine nicht ganz unwichtige Beobachtung habe ich noch beim Intervall der kleinen Sexte gemacht, dass man nämlich unter Umständen wohl einen Differenzton, den ihn erzeugenden Primärton aber nicht hören kann. Bekanntlich tritt bei Intervallen zwischen Quinte und Oktave der zweite Differenzton ($2t - h$) stärker hervor als der erste; ja vielfach ist er überhaupt allein zu hören. Bei Tönen der kleinen und eingestrichenen Oktave, wie ich sie zu meinen Beobachtungen am liebsten verwende, höre ich nun beim Intervall 5:8 den Ton 3 nur dann einigermaßen deutlich, wenn 8 recht stark tönt; dagegen die Töne 1 und 2 (ich nehme hier beide immer zusammen, da ich nicht im Stande bin in jedem einzelnen Falle zu sagen, wie viel von dem tiefen Differenztone auf 1, wieviel auf 2 kommt, wenn er auch manchmal mehr, manchmal weniger brummend ist) höre ich stets deutlich, besonders stark freilich, wenn die Gabel 5 stark ertönt. Bei Gabeln der zwei- und dreigestrichenen Oktave dagegen höre ich auch den Differenzton 3 leicht und deutlich. Ich glaube, dass dieses Verhalten seinen Grund in verschiedener Stärke irgend welcher Theiltöne bei den verschiedenen hohen Gabeln hat, kann freilich bestimmte Vermuthungen in dieser Hinsicht nicht aussprechen. Dass die absolute Tonhöhe hier irgend einen Einfluss haben könnte, halte ich für sehr unwahrscheinlich, zumal da bei noch höheren, durch GALTON-Pfeifchen hervorgebrachten Tönen, sobald man die Quinte über-

schritten hat, wiederum nur der zweite Differenzton deutlich zu hören, vom ersten kaum eine Spur zu entdecken ist. Ich habe nun bereits früher nachgewiesen, dass der tiefe Differenzton (1 plus 2) beim Intervall 5 : 8 auch dann bestehen bleibt, wenn der Oberton 10 durch Interferenz beseitigt ist. Jetzt habe ich noch folgenden Versuch angestellt. Durch Flaschen wurde ein starker Ton 5 und ein schwacher Ton 8 hervorgebracht. Sie wurden vermitteltst einer durch das anstossende Zimmer hindurchführenden fast 8 Meter langen Röhre aus einem dritten Zimmer (wie immer bei derartigen Versuchen) beobachtet. Bei dem Tone 5 konnte durch Verwerthung der Resonanz der Röhrenleitung erreicht werden, dass trotz seiner Stärke am Ende der Leitung (er liess freilich auch sonst nur eine schwache Oktave und Duodezime hören) kein Oberton herausgehört werden konnte. Der Ton 8 wurde so schwach gemacht, dass er im Zusammenklange mit 5 nicht herauszuhören war. Trotzdem bewirkte das thatsächliche Hinzutreten des höheren Tons zu 5 eine äusserst auffallende Veränderung des Klanges. Es trat nämlich sofort der tiefe Differenzton (1 plus 2) auf, und das Ganze nahm einen sehr tiefen, brummenden Charakter an. Man hört also hier einen Differenzton, obwohl man den ihn erzeugenden Ton gar nicht hört. Von dem Differenztone 3 ist in diesem Falle, wie ich noch bemerken möchte, ebensowenig etwas zu hören wie von dem Primärtone 8.

IV. Auf noch eine bemerkenswerthe Erscheinung möchte ich aufmerksam machen. Wenn man beim Intervall 4 : 5 die Primär- und Differenztöne aufmerksam beobachtet, so hört man (und zwar habe ich dies bei Stimmgabel- wie bei Zungentönen in gleicher Weise bemerkt), dass der Primärton 4 und der Differenzton 3 immer abwechselnd hervortreten. Zuerst glaubte ich, da mir dies an einem nicht völlig rein gestimmten Intervalle auffiel, dass es sich hier um Schwebungen handle. Aber bei reinen Intervallen tritt dieselbe Erscheinung ein, und ausserdem haben wir hierbei keinen Rhythmus, sondern der Wechsel der Empfindung tritt unregelmässig ein, gewöhnlich nach etwa einer halben Sekunde, oft auch nach $1\frac{1}{2}$ Sekunden. Man hört stets gleichzeitig beide Töne, 3 auch 4, aber abwechselnd ist immer der eine, dann der andere stärker. Der Eindruck ist ein ähnlicher, als wenn man Kirchenglocken läuten hört. Ich

habe versucht durch Konzentration der Aufmerksamkeit auf einen der beiden in Frage kommenden Töne den Umschlag der Empfindung zu verhindern. Es ist mir nicht gelungen. Der Wechsel trat ein, ob ich wollte oder nicht. Uebrigens ist diese Erscheinung keineswegs auf das Intervall 4:5 beschränkt. Beim Intervall 5:6 sind es die Töne 3 und 4, die einander gewissermaassen immer ablösen; beim Intervall 6:7 die Töne 4 und 5. Ich glaube kaum, dass man diese Thatsache anders erklären kann als durch die Annahme, dass hier dem die wechselnden Töne erzeugenden Reize eine gewisse Zweideutigkeit zukommt, so dass eben so leicht die eine, wie die andere Empfindung entstehen kann, in Folge unbekannter Vorgänge aber in den nervösen Organen (in centraleren Theilen wahrscheinlich) bald die eine, bald die andere Empfindung eintritt. Worin eine derartige Zweideutigkeit des Reizes bestehen kann, werde ich später zeigen.

V. Es fiel mir auf, dass ich bei Stimmgabeltönen bei der verstimzten Quinte den Differenzton stets sehr deutlich schweben hörte, bei den Intervallen 3:4 und 4:5 schon weniger deutlich; bei 5:6 und 6:7 mussten die Gabeln sehr stark zum Tönen gebracht werden, um Schwebungen des Differenztons 1 hören zu lassen. Bei noch grösseren Verhältnisszahlen konnte ich deutliche Schwebungen des Differenztons 1 überhaupt nicht mehr hören. Ich schloss hieraus, dass Obertöne der Primärtöne bei der Erzeugung der Differenztonschwebungen eine Rolle spielen müssten.

Für diese Vermuthung fanden sich nun leicht Bestätigungen. Bei Flaschentönen, die ich zu anderweitigen Untersuchungen brauchte und so obertonfrei als möglich hergestellt hatte, musste ich — damals zu meinem Aerger — bemerken, dass es mir nicht gelingen wollte, die Intervalle wie gewöhnlich dadurch rein zu stimmen, dass ich die Differenztonschwebungen zum Verschwinden brachte. Ich konnte diese Schwebungen bei keinem Intervall mit alleiniger Ausnahme der Quinte deutlich genug hören. Die entgegengesetzte Erscheinung tritt bei den obertonreichen Zungentönen ein. Hier kann man beim Intervall 8:9 die Schwebungen des Differenztons 1, wenn das Intervall um ein geringes verstimmt ist, mit vollkommener Deutlichkeit hören.

Jetzt kam es nur noch darauf an, festzustellen, welche Obertöne die Schwebungen des Differenztons verursachen. Zuerst dachte ich an die ersten zusammenfallenden Obertöne, die man bei Zungentönen sehr lebhaft schweben hört. Beim Intervall $4:5$ wäre dieser erste zusammenfallende Oberton $4 \cdot 5 = 20$. Ich entfernte nun bei zwei Zungentönen 400 und 500 (mit geringer Verstimmung) den Ton 2000 durch Interferenz, konnte aber dadurch die Schwebungen des tiefen Differenztons 100 nicht beseitigen. Wohl aber zeigte sich, dass die Differenztonschwebungen gänzlich verschwanden, wenn der Interferenzapparat so eingestellt war, dass die zwischen 1500 und 1600 liegenden Töne verschwanden. Der Differenzton 100 war dann vollständig glatt und klar und recht laut zu hören; daneben hörte man den Ton 2000 sehr deutlich schweben. Man kann sich übrigens grade an diesem Falle leicht davon überzeugen, dass höhere Schwebungen (entgegen HERMANN'S Ansicht) nicht im Geringsten den Schein erwecken, dass ein tieferer, gleichzeitig vorhandener und thatsächlich glatter Ton in dem Rhythmus des höheren Tones schwebt. Ich glaube hieraus schliessen zu dürfen, dass beim Intervall $4:5$ die Differenztonschwebungen bedingt sind durch das Vorhandensein der Obertöne $4 \cdot 4 = 16$ und $3 \cdot 5 = 15$.

Man kann sich dies auch wohl folgendermaassen klar machen. 400 und 501 geben als Differenz 101, 1600 und 1503 geben als Differenz 97, und die beiden Differenztöne 101 und 97 müssen nun viermal schweben. Solche Betrachtungen sind durchaus nützlich, wenn man nur einen Anhalt gewinnen will, was für Erscheinungen beim Zusammenklange zweier Töne möglicher Weise eintreten könnten; als eine wissenschaftliche Erklärung von Schwebungen und Differenztönen können aber derartige Multiplikationen und Subtraktionen in keinem Falle gelten, da hierdurch nicht nur über die physiologischen Vorgänge nicht das Geringste ausgesagt wird, sondern auch vor Allem diesem Erklärungsprinzip die Allgemeingiltigkeit fehlt.

Ich habe nun versucht, auch bei anderen Intervallen, deren Verhältnisszahlen sich nur um eine Einheit unterscheiden, experimentell festzustellen, welche Obertöne vorhanden sein müssen, damit Schwebungen des Differenztones entstehen können. Doch ist es mir bisher nicht gelungen, zu sicheren Ergebnissen zu gelangen. Indessen glaube ich nicht fehlzugehen, wenn ich

annehme, dass die Differenztonschwebungen allemal bedingt sind durch die Obertöne t^2 und h ($h-2$), bei der Quarte also durch die Obertöne $3^2 = 9$ und $4 \cdot 2 = 8$, bei der Quinte allein durch $2^2 = 4$, da $3 \cdot 1$ der Grundton selbst ist. Bei der Oktave würden die beiden Formeln gar keinen neuen Ton ergeben. Hier sind nun auch, wie wir gleich sehen werden, die Schwebungen von etwas andern Umständen abhängig.

VI. Es ist wohl von R. KÖNIG zuerst erwähnt worden, dass beim Zusammenklange zweier Töne, wenn die Schwingungszahl des einen ein etwas verstimmtes Vielfaches der Schwingungszahl des andern ist, Schwebungen gehört werden, und zwar solche des höheren und des tieferen Tones. Dass die höheren Schwebungen fortfallen, wenn der betreffende Oberton des tieferen Tones durch Interferenz beseitigt wird, hat STUMPF¹ nachgewiesen. In Bezug auf die tiefen Schwebungen jedoch findet sich, wie ich mich nachträglich überzeugte, in seiner Abhandlung eine zu weitgehende Angabe, dass man nämlich Schwebungen des tieferen Tones immer vernehmen werde. Diese Angabe beruht in ihrer Allgemeinheit nur auf einer theoretischen Erwägung. („Die tiefen Schwebungen rühren von der Bildung eines Differenztones her, der dem tieferen Primärton nahe liegt und mit diesem schwebt.“) Ich habe neuerdings bei einem Flaschentone von sehr mildem, aber hinreichend starkem Klange den zweiten Theilton durch Interferenz beseitigt. Dann waren, obwohl der tiefe Ton sehr gut hörbar war, bei keinem Intensitätsverhältniss und bei keiner Verstimmung (von 1 bis mehr als 10 Schwingungen) der höheren Oktave Schwebungen hören, weder zu solche des tieferen noch solche des höheren Tons. Sobald jedoch der Oberton etwas zugelassen wurde, traten sie beide gleichzeitig auf. Niemals habe ich die eine Art Schwebungen ohne die andere hören können. Stets waren beiderlei Schwebungen da oder gar keine.² Daran ist übrigens auch jetzt durchaus

¹ *Wiedemann's Ann.* Bd. 57, S. 660 ff. 1896.

² Auch Professor STUMPF hat sich von diesem Sachverhalte überzeugt. Die Angabe in der erwähnten Abhandlung S. 671, dass bei 300 und etwas verstimmtem 600 nur die tiefen Schwebungen vernommen wurden, ist darauf zurückzuführen, dass, wenn der Oberton sehr schwach vorhanden ist, die tiefen Schwebungen bedeutend auffälliger sind, so dass man oft nur im letzten Moment, wenn der höhere Gabelton im Verschwinden ist, die

festzuhalten, dass die tiefen Schwebungen nicht etwa scheinbar sind, wie HERMANN¹ meint, sondern in gleicher Weise empfunden werden wie die hohen, wenn sie auch in der Regel nicht so ausgeprägt sind wie die hohen.

VII. Es ist oft behauptet worden, dass die Differenztöne bei reinen durch kleine Zahlen darstellbaren Intervallen stärker seien als bei verstimmtten. In dieser allgemeinen Formulierung scheint mir diese Behauptung jedoch nicht richtig zu sein. Ich habe erst kürzlich folgenden Versuch mit zwei GALTONpfeifchen gemacht. Die eine Pfeife gab den konstanten Ton 4800, die andere wurde ganz langsam kontinuierlich verändert von 4900 bis 7200. Dabei überzeugte ich mich, dass sie bei jeder Stimmung innerhalb dieses Bereiches einen gleich starken Ton gab. Ich habe nun den Differenzton von 100 bis 2400 verfolgt, hin und zurück, mehreremal, konnte aber an keinem Punkte feststellen, dass er auch nur die geringste Stärkeschwankung machte, obwohl die Primärtöne hier alle möglichen reinen und verstimmtten Intervalle durchlaufen.

Wahrscheinlich wird der Eindruck der grösseren Stärke des Differenztons bei reinen Intervallen durch den ruhigen Abfluss des Tons hervorgerufen. Dies steht allerdings scheinbar zu einer allgemeinen psychologischen Erfahrung im Gegensatz. Intermittierende Empfindungen werden ja leichter wahrgenommen als gleich bleibende. Doch handelt es sich hierbei im Allgemeinen nur um leichtere Erregung der Aufmerksamkeit. Mit flackerndem Lichte darf man intermittierende Töne nicht vergleichen, weil beim Gehör eine Ermüdung und Erholung des Sinnesorgans kaum vorliegt. Ich habe noch nie gleich stark bleibende Töne stärker gehört, wenn ich dem Ohre eine kurze Erholungspause gönnte. Was ich konstatiren kann, ist höchstens, dass es schwer wird, die Aufmerksamkeit auf einen Ton zu konzentriren, wenn man ihn 10 Minuten oder noch länger immer in unveränderter Stärke zu

hohen Schwebungen vernehmen kann, wie wir dies auch jetzt konstatirten. Es muss daher bei jenem Versuche der erste Oberton nicht vollständig genug ausgeschlossen gewesen sein. Die Thesis der Abhandlung, dass, wo immer hohe Schwebungen vorhanden, auch die entsprechenden Obertöne vorhanden sind, wird natürlich hierdurch nicht alterirt, sondern nur wieder bestätigt.

¹ *Wiedemann's Ann.* Bd. 58, 1896.

hören bekommt. Man überhört ihn schliesslich, während man ihm nach kurzer Unterbrechung wieder leichter die Aufmerksamkeit zuzuwenden vermag. Es kann wohl nicht davon die Rede sein, dass ein intermittirender Ton im Ganzen — abgesehen natürlich von kleinen Zeittheilen — stärker ist als ein ruhender. Ich glaube nun, dass, wenn man den tiefen Differenzton in gleichmässig anhaltender Stärke hört, dies einen vollen, befriedigenden Eindruck macht, während der schwebende Differenzton, namentlich der schneller schwebende das Gefühl des Unbefriedigtseins erweckt, als fehle in der Empfindung etwas, das wir von ihr erwarten. Hierdurch dürfte der Schein erweckt werden, als sei der Differenzton bei verstimmtten Intervallen schwächer. Auch dass die Verschmelzung mehrerer konsonanter Differenz- und Primärtöne dabei eine Rolle spielt, ist wohl nicht ausgeschlossen. Ich erwähnte bereits, dass ich beim Intervall 5 : 8 die Differenztöne 1 und 2 nicht so zu trennen vermag, dass ich über die Intensität jedes einzelnen ein Urtheil fällen könnte. In solchem Falle scheint es mir nun ganz natürlich, dass die Summe einen stärkeren oder sozusagen grösseren Eindruck macht als ein einzelner Ton. Bei Verstimmung des Intervalls müssten die Töne leichter getrennt werden, da sie dann keine Oktave mehr bilden.

Besonders vorsichtig muss man mit Schlussfolgerungen sein, wenn man mit obertonreichen Tönen operirt, denn bei solchen pflegt jeder Differenzton durch das Zusammenwirken mehrerer Paare von einfachen Tönen zu Stande zu kommen. Bei minimaler Verstimmung der Primärtöne entstehen dann Schwebungen, bei Verstimmung um mehrere Schwingungen aber werden aus dem Einen Differenzton mehrere, von denen nun jeder einzelne nicht so stark sein kann als der ursprüngliche Eine.

VIII. Bei kleinen (etwa Halbton-) Intervallen hört man ziemlich leicht einen Zwischenton als Träger der Schwebungen, welche Thatsache von STUMPF zuerst festgestellt worden ist. Nun behauptet EBBINGHAUS in seiner kürzlich erschienenen „Psychologie“ (S. 317): „— bei grösseren Entfernungen — verschwindet der Zwischenton vollkommen, die Schwebungen aber, die doch an ihm haften sollen, verschwinden nicht auch, sondern bleiben hörbar noch bei beträchtlich grösseren Intervallen, und zwar

haften sie deutlich an den beiden Primärtönen.“¹ Ich kann mich dieser Meinung nicht anschliessen.

Bei kleinen Intervallen, z. B. den Tönen 240 und 250, höre ich überhaupt nur einen schwebenden Zwischenton, nicht zwei Töne. Die Höhe des Zwischentons hängt nach meinen Beobachtungen ab von dem Stärkeverhältniss der Primärtöne; der Zwischenton liegt nur dann, wenn die Primärtöne gleich stark sind, etwa in der Mitte zwischen beiden, bei ungleichen Primärtönen näher an dem stärkeren. Einen ähnlichen Eindruck habe ich selbst noch bei einem Terzenintervall in tieferer Lage, wo die Differenz der Schwingungszahlen noch klein ist, z. B. bei den Tönen 100 und 120. Doch treten hier neben dem Zwischentone bereits die Primärtöne auf, wenn auch ziemlich schwach. (Es handelt sich selbstverständlich stets darum, welche Töne man gleichzeitig hört; denn wenn man den Kopf erst in eine für den einen, dann für den andern Primärton günstige Lage bringt, so hört man natürlich nach einander die beiden Primärtöne und von einem Zwischentone kaum eine Spur.) In höheren Lagen sind bei Intervallen, die grösser sind als ein Halbton, die Primärtöne stärker und der Zwischenton schwächer zu hören. Einigermassen deutlich ist letzterer nur dann, wenn die Primärtöne gleich stark sind und der Zwischenton in Folge dessen von beiden gleich weit entfernt ist. Unter dieser Bedingung konnte ich bei c^2 und d^2 (512 und 576) mit Sicherheit einen rauhen Zwischenton von der ungefähren Höhe cis^2 wahrnehmen.

Diese Beobachtungen beziehen sich nur auf einen Zusammenklang von zwei Stimmgabeltönen, und ich möchte noch ausdrücklich davor warnen, etwa anzunehmen, dass in Akkorden, in denen ähnliche Intervalle in entsprechenden Höhenlagen vorkommen, dieselben Erscheinungen auftreten müssten. Derartige Schlüsse von Zweiklängen auf Mehrklänge führen fast immer zu unrichtigen Ergebnissen. Auch wenn man statt der Stimmgabeltöne zwei obertonreichere Töne anwendet, macht man andere Beobachtungen. Bei den Zungentönen 100 und 120 oder 512 und 576 habe ich keine deutliche Empfindung eines Zwischentons feststellen können. Es scheint mir, als ob in diesen Fällen die Aufmerksamkeit zu sehr durch die scharfen Primärtöne in

¹ Aehnlich ist auch die Angabe von STUMPF, *Tonpsychol.* II, S. 481.

Anspruch genommen wird. Die Schwebungen scheinen mir jedoch auch bei diesen Zungentönen keineswegs deutlich an den Primärtönen zu haften. Ich kann über ihre Höhenlage zu keinem Urtheile kommen und würde sie, wenn man durchaus eine Aussage von mir verlangte, höchstens deshalb den Primärtönen zuschreiben, weil ich sonst nicht wüsste, wem.

EBBINGHAUS' Theorie.

EBBINGHAUS ist zwar mit der Resonanzhypothese in der HELMHOLTZ'schen Form nicht ganz einverstanden, glaubt aber (S. 316 seiner „Psychologie“) daran festhalten zu müssen, weil die in pathologischen Fällen vorkommenden Tonlücken und Toninseln ohne die HELMHOLTZ'sche Vorstellung vollkommen räthselhaft seien. Er macht jedoch zur Erklärung der Differenztöne den Zusatz, dass jede Faser der Basilarmembran nicht nur auf den Grundton, sondern auch auf sämtliche Obertöne in Mitschwingung gerathe,¹ wenn auch um so schwächer, je höher ihre Ordnungszahl ist. Wir wollen nun dahingestellt lassen, ob die Resonanzlehre die einzig mögliche Erklärung der Tonlücken ist. Soviel aber scheint klar, dass gerade EBBINGHAUS' Zusatz die kaum gewonnene Erklärung wieder zu nichte macht.²

Stellen wir uns einmal auf den Boden von EBBINGHAUS' Theorie und denken wir uns eine Schnecke, in der sämtliche Resonatoren von 800 bis 2500 Schwingungen durch einen Krankheitsprozess zerstört seien. Nun halten wir dem unglücklichen

¹ Mit der spezifischen Energie im Sinne HELMHOLTZ' ist das Mitschwingen der Membranfasern unter Knotenbildung nicht recht zu vereinigen. HELMHOLTZ sah sich deshalb zu der Annahme genöthigt, dass die Knotenbildung durch die Struktur der Membran sehr erschwert sein müsse.

² EBBINGHAUS' Theorie liegt bis jetzt nur theilweise vor, und es ist wahrscheinlich, dass er im weiteren Verlaufe seiner Darstellung auf die im Folgenden erwähnte Schwierigkeit selber noch eingehen wird. Vielleicht versucht er ihr damit zu begegnen, dass in den fraglichen pathologischen Fällen die Knotenbildung der Fasern verhindert sei. Dann müsste in diesen Fällen nach seiner Theorie das Hören von Differenztönen ausgeschlossen oder doch beeinträchtigt sein.

Besitzer dieses unvollkommenen Gehörorgans eine schwingende Stimmgabel von 1000 Schwingungen vor das Ohr. Nach BEZOLD, auf dessen Abhandlung (*Zeitschr. f. Psychol.*, Bd. XIII, S. 161, 1897) ich noch zu sprechen komme, kann der Patient dann diesen Ton tatsächlich nicht hören. Nach EBBINGHAUS aber müsste er ihn hören, denn der Resonator 500 ist ja unverletzt; der Resonator 500 macht auch mit Leichtigkeit 1000 Schwingungen, denn er braucht dazu ja bloß einen einzigen Knoten zu bilden (von den tieferen Untertonresonatoren gilt das Entsprechende); die anliegenden Nervenzellen sind auf den Ton 1000 ebenfalls ausserordentlich gut eingeübt, denn so oft während des ganzen Lebens des Individuums der Ton 1000 das Ohr traf, erhielten sie stets von dem zugehörigen Resonator „500“ dieselben 1000 Schwingungsreize: Weshalb in aller Welt wird denn jetzt der Ton 1000 nicht gehört?

Wenn also EBBINGHAUS meint, ohne die Resonanz seien die Tonlücken und Toninseln räthselhaft, so muss ich bekennen, dass sie mir unter Voraussetzung von EBBINGHAUS' Theorie nicht im Geringsten weniger räthselhaft erscheinen. Hier gibt es nur ein Entweder — oder: Entweder, wir halten an der Resonanz ohne EBBINGHAUS' Erweiterung fest und erklären damit ausser der Zerlegung einer Tonwelle in ihre Komponenten noch die pathologischen Fälle der Tonlücken und Toninseln, verzichten aber ausdrücklich darauf, die Fülle der übrigen im normalen Zustande auftretenden Erscheinungen zu erklären; oder wir geben die Resonanzhypothese auf, erklären die so sehr interessanten Empfindungen des normalen Ohres und bekennen, dass wir über die Entstehung jener pathologischen Vorkommnisse vorläufig noch nichts Genaues wissen. Ich für meinen Theil ziehe das Letztere vor.

Wir haben gesehen, dass beim Zusammenklange zweier Töne, die ein etwas verstimmtes Oktavenintervall bilden und von denen der tiefere die Oktave als Oberton enthält, Schwebungen des tiefen Tones sich bemerkbar machen. Dies muss nach EBBINGHAUS so erklärt werden: Die den Membranfasern anliegenden Nerven (die übrigens jede Tonempfindung vermitteln können, wenn sie nur in dem entsprechenden Rhythmus gereizt werden) sind auf den dem Grundtone ihrer Faser zugehörenden Nervenprozess am besten eingeübt, auf die den Obertönen zugehörenden Prozesse um so weniger, je höher

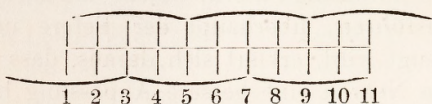
die Ordnungszahl des in Frage kommenden Obertones ist. Alle Fasern nun, die auf gemeinsame Untertöne abgestimmt sind, machen die aus Grundton nebst erstem Obertone und der verstimmtten Oktave zusammengesetzte Schwingungsbewegung; und wenn diese die Periode 1 hat, so muss der tiefe Ton einmal schweben. Dass durch die Fasern, welche die zusammengesetzte Schwingung ausführen, überhaupt der tiefere und nicht der höhere Ton erzeugt wird, erklärt sich daraus, dass eben für den tieferen Ton die Nerven eine bessere Anpassung haben, weil er der Grundton der Faser selbst ist oder doch diesem näher liegt. (Dass gleichzeitig an anderer Stelle der Membran der dem höheren Ton entsprechende Nervenprozess zu Stande kommt, ist selbstverständlich.)

Aber es bleibt doch noch eine Schwierigkeit übrig. Bei KÖNIG¹ finden wir eine Anzahl von Schwingungskurven, wie sie dem Zusammenklange zweier einfachen Töne entsprechen, von denen der eine ein etwas verstimmttes Vielfaches des andern ist. Beim verstimmtten Einklange, den wir auf der ersten Figur sehen, hören wir auf Eine Periode Eine Schwebung. Nun frage ich: Weshalb hören wir hier eine Intensitätsschwankung? Es giebt zwei Möglichkeiten: Entweder: weil die Entfernung des schwingenden Theilchens von der Gleichgewichtslage nach der positiven Seite hin an einzelnen Stellen der Kurve sehr gross, an andern sehr klein ist, oder: weil der senkrechte Abstand eines Kurvenmaximums vom nächst vorhergehenden Minimum an einigen Stellen sehr gross, an andern sehr klein ist. Es ist nicht einzusehen, weshalb beide Ursachen dieselbe physiologische Wirkung haben sollen. Wir können diese beiden unter Voraussetzung der Resonanzhypothese möglichen Arten, die Intensität der Empfindung aus der Beschaffenheit des Reizes zu erklären, auch noch anders formuliren: Die Stärke der Reizung einer Nervenzelle hängt entweder ab vom absoluten oder vom relativen Druck. Letzteres bedeutet dasselbe, wie: Die Intensität der Reizung hängt ab von der Grösse der Differenz zwischen einem Druckmaximum und dem vorhergehenden Druckminimum.

Bleiben wir zunächst bei dieser letzteren Anschauung, von der ich glaube, dass sie, obwohl dieses Problem meines

¹ Expériences d'acoustique, S. 97.

Wissens noch nirgends erörtert worden ist, den meisten die plausibelste sein wird. Nun betrachten wir einmal bei KÖNIG die Schwingungskurve bei der verstimzten Oktave. Die Schwingungen vertheilen sich um die Gleichgewichtslage in der Weise, wie ich es durch nachstehende Figur andeute. Der



grösste senkrechte Abstand der Begrenzungskurven liegt bei 2, 4, 6, 8 u. s. w. Da nun die erste Periode von 1 bis 5, die zweite von 5 bis 9 reicht, so müssten wir, wenn die oben vorausgesetzte Erklärung der Intensität richtig wäre, in jeder Periode zwei Schwebungen hören.

Gehen wir nun gleich zu der andern Möglichkeit über, dass die Intensität vom absoluten Druck abhängt. Dieser ist am stärksten bei 3, 7 u. s. w. Wir müssten danach also in jeder Periode nur Eine Schwebung hören. Thatsächlich aber hören wir, wenn der tiefere Ton absolut einfach ist, überhaupt keine Schwebungen.

EBBINGHAUS' Theorie erklärt also zu viel, denn nach ihr müssten wir auch bei obertonfreien Tönen, die ein verstimztes Oktavenintervall bilden, den tiefen Ton zweimal oder einmal während der Periode schweben hören.

Nur ein einziger Ausweg scheint mir für EBBINGHAUS hier offen zu bleiben: Er muss annehmen, dass zwar die Reizintensität nicht vom absoluten Druck (dessen Schwankungen nach KÖNIG's Figur ziemlich beträchtlich sind) abhängt, sondern vom relativen Druck, dass aber die in diesem Falle eigentlich zu erwartenden beiden Schwebungen des tiefen (obertonfreien) Tones deshalb nicht zu bemerken sind, weil die Schwankungen des relativen Druckes zu gering sind.

Ich hielt diese — zunächst vielleicht ziemlich überflüssig erscheinende — Erörterung der Frage, was in EBBINGHAUS' Theorie unter Reizintensität zu verstehen ist, für nothwendig, um im Folgenden mit ganz bestimmten Voraussetzungen operiren zu können. Denn mit dem Sich-genügen-lassen, wenn man für jeden Ton und jede Schwebung die entsprechende Periodik gefunden zu haben glaubt, ohne zu sagen, was für ein physio-

logischer Vorgang denn da nun eigentlich periodisch sein soll, scheint mir in der Theorie der Tonempfindungen bisher gar zu arg gesündigt worden zu sein.

Beim Intervall 5:8 hört man die Differenztöne 3, 2 und 1. Wie diese aus EBBINGHAUS' Theorie folgen sollen, verstehe ich nicht. Es werden ja in diesem Falle wohl mehrere Stellen der Basilarmembran da sein, die auf gemeinsame Untertöne abgestimmt sind, also wird auch an mehreren Stellen die Membran die zusammengesetzte Schwingung machen. Es wäre daher möglich, dass an einigen Stellen der Ton 1, an andern 2, an andern 3 erzeugt würde. Aber weshalb hier 3, da 2, da 1? Für eine Beantwortung dieser Frage finde ich bei EBBINGHAUS keine Anhaltspunkte. Wie ich gezeigt habe, kann die Intensität der Nervenreizung bei EBBINGHAUS' Theorie nur davon abhängig gesetzt werden, wie gross der Ordinatenunterschied eines jeden Kurvenmaximums und nächst vorhergehenden Minimums ist. Bei der Kurve Fig. 2 meiner früheren Abhandlung sind diese Unterschiede unter Annahme einer willkürlichen Einheit folgende: 72, 21, 44, 64, 14, 64, 44, 21. Die drei stärksten Reizungen sind 72, 64, 64; dazwischen liegen schwächere. Hält man nun die Verschiedenheit von 72 und 64 im vorliegenden Falle für verschwindend klein, so müsste und könnte einzig und allein der Differenzton 3 entstehen; hält man sie nicht für so geringfügig, so ist zu berücksichtigen, dass die Reizungen einmal in der Periode bei 72 ein Stärkemaximum erreichen, und dann könnte einzig und allein der Differenzton 1 entstehen. Dieser ist auch am ehesten zu erwarten, wenn man der Theorie konsequent folgt, da auf diesen als den tiefsten und ihrem Grundtone am nächsten liegenden die in Betracht kommenden Nerven relativ am besten (d. h. mehr als auf 2 und 3) eingeübt sind. Wie es aber kommt, dass 1, 2 und 3 gleichzeitig gehört werden, dürfte aus EBBINGHAUS' Theorie schwer zu erklären sein. Giebt es da nervöse Organe, denen die Eigenschaft zukommt, wenn sie auf so eigenthümliche Weise gereizt werden, wie es eine zusammengesetzte Schwingungskurve sichtbar macht, dann gleichzeitig eine Mehrheit von nervösen Prozessen entstehen zu lassen, von denen der eine die Schwebungen, die andern die verschiedenen Differenztöne zur Empfindung bringen? Dann finde ich es einfacher, zu der Ansicht WUNDT's zurückzukehren, dass der Akustikusstamm dies alles — auf unbekannte Weise freilich — besorge.

Bei der Kurve Fig. 4 meiner früheren Abhandlung betragen die Ordinatenunterschiede: 62, 20, 60, 26, 47, 47, 26, 60, 20. Betrachtet man hier den Unterschied von 47 und 62 als verschwindend klein, so erhalten wir 5 Reizungsmaxima, müssten also den Ton 5 hören, von dem keine Spur vorhanden ist. Sicherlich aber müssen wir den Unterschied von 60 und 62 vernachlässigen. Denn um uns überhaupt eine bestimmte Vorstellung machen zu können, mussten wir ja voraussetzen, dass kleine Schwankungen der Reizstärke ohne Einfluss bleiben. Und die Schwankungen, die wir damals bei der verstimmten Oktave zuliessen, ohne dass sie Schwebungen bewirkten, waren weit grösser als diese. Somit hätten wir bei 62, 60 und 60 drei Reizmaxima. Ich weiss nicht, ob irgend jemand beim Intervall 4:9 den Ton 3 gehört hat. Wenn er überhaupt da ist, so ist er jedenfalls ausserordentlich schwach. Recht stark jedoch ist der Ton 1 zu hören, von dem garnicht einzusehen ist, wie er nach EBBINGHAUS' Theorie zu Stande kommen soll, es sei denn, dass man wieder die Ausflucht macht, es sei ja eine Periodik 1 da. Ich könnte die Beispiele dieser Art, die der Theorie Schwierigkeiten machen, leicht vermehren.

Wenn man objektiv drei Töne erzeugt, deren Verhältnisszahlen 107, 100 und 6 sind,¹ so hört man ausser dem Differenztone $107 - 100 = 7$ auch noch den Ton 1. Man kann diesen so ableiten: Der Differenzton 7 giebt mit dem objektiven Tone 6 den neuen Differenzton $7 - 6 = 1$. Um den Ton 1 aus EBBINGHAUS' Theorie zu erklären, müssen wir annehmen, dass die auf den gemeinsamen Unterton 1 abgestimmte Faser gleichzeitig die Schwingungen aller drei Töne ausführt. EBBINGHAUS' Theorie setzt also voraus, dass die Membranfasern selbst noch auf den hundertsiebenten Oberton in lebhaftes Mitschwingen gerathen. Mir scheint dies freilich aus rein physikalischen Gründen ausgeschlossen zu sein, dass die Fasern der Basilarmembran unter Bildung von 106 Knoten noch irgendwie in Betracht kommende Transversalschwingungen machen könnten. Doch wenn wir es wirklich annehmen würden, so wäre damit der Ton 1 doch nicht erklärt, denn die einmal auf die Periode

¹ In dem von mir angestellten Versuche war die Einheit der Verhältnisszahlen gleich 80 Schwingungen. Der Ton 6 wurde durch eine Resonanzgabel, die beiden anderen durch GALTON-Pfeifchen erzeugt.

fallende Schwankung des relativen Druckes ist in diesem Falle, wie man sich durch Konstruktion der Kurve überzeugen kann, verschwindend klein. Auch die an der Untertonfaser 1 liegenden Nerven müssten demnach den Ton 7 zur Empfindung bringen.

Auch die Thatsache vermag EBBINGHAUS' Theorie nicht zu erklären, dass man bei dem Intervall 8:9 die Töne 9, 8, 7, 6, 5 und 1 hört.¹ Dass diese Töne sämtlich hörbar sind — freilich nicht alle gleich stark —, steht mir ohne jeden Zweifel fest.

Die Unmöglichkeit der Existenz von Resonatoren im Ohre.

Mir scheint sowohl der Versuch HERMANN's² wie der EBBINGHAUS', die Widersprüche der Resonanztheorie durch eine Erweiterung derselben zu beseitigen, gescheitert zu sein. Ich habe die Ueberzeugung gewonnen, dass die Resonanzhypothese je eher, je besser gänzlich aufgegeben werden muss, dass sie geradezu ein Hemmniss ist in der Entwicklung unserer Kenntnisse über das Zustandekommen der Tonempfindungen. Im Folgenden möchte ich nun kurz die Thatsachen zusammenfassen, welche direkt gegen das Vorhandensein von Resonatoren sprechen.

Die Thatsache, dass ein die Oktave als Theilton enthaltender Ton, wenn gleichzeitig die verstimmte höhere Oktave erklingt, selber (der Grundton) schwebt, ist mit der auf die Voraussetzung der Resonanz und der spezifischen Energien gegründeten Theorie HELMHOLTZ' überhaupt unvereinbar: Die Summe von Tönen wird im Ohre wieder vollständig zerlegt; um Schwebungen zu erzeugen, müssen nach HELMHOLTZ dieselben Theile der Basilar-membran durch zwei Schwingungen erregt werden; dieser Fall muss bei den beiden höheren Tönen eintreten und diese müssen schweben, er kann aber bei Tönen, die um eine Oktave auseinanderliegen, nie eintreten; folglich sind Schwebungen des

¹ S. 194 meiner früheren Abhandlung, *Zeitschr. f. Psych.* Bd. XI.

² Eine Kritik von H.'s Theorie enthält meine frühere Abhandlung S. 195 ff.

tiefen Tons nach der Theorie unter allen Umständen ausgeschlossen¹, während sie in Wirklichkeit jederzeit leicht beobachtet werden können.

Dass HELMHOLTZ selbst von der Existenz von Resonatoren im Ohre keineswegs ganz überzeugt war, ersieht man aus seinem Bemühen, das Vorhandensein von Resonatoren nur ja nicht als etwas anderes als eine blossе Hypothese hinzustellen. Es widerstreitet allen physikalischen Erfahrungen, so winzigen Körperchen, wie den Membranfasern, so tiefe Eigentöne zuzuschreiben. Man pflegt sich damit zu beruhigen, dass man annimmt, die kleinen Fasern könnten ja entsprechend belastet sein. Bisher hat aber noch Niemand solche anatomischen Unterschiede aufgezeigt, die auf verschiedene Belastung schliessen liessen, obwohl die Unterschiede doch kolossal sein müssen, wenn Saiten, die so geringe Längenverschiedenheiten aufweisen, wie die längsten und kürzesten Fasern der Membran, einerseits den Eigenton 20000, andererseits den Eigenton 20 haben sollen.

BEZOLD² glaubt seine interessanten Untersuchungen über die Tonempfindung an partieller Taubheit Leidender als „eine wesentliche Stütze für die Hypothese von HELMHOLTZ“ betrachten zu können. Es ist leicht zu zeigen, dass gerade seine eigenen Beobachtungen die Unmöglichkeit der Existenz von Resonatoren im Ohre beweisen. BEZOLD benutzte Stimmgabeln, die nach seiner Angabe vollkommen obertonfrei sind. Für die Einfachheit der Stimmgabeltöne versucht er zwei Beweise, die beide verfehlt sind. Der eine geht merkwürdiger Weise aus von der HELMHOLTZ'schen Theorie, die doch gerade durch BEZOLD's mit Hilfe dieser Gabeln gemachte Beobachtungen erst gestützt werden soll: Die Kranken, welche für den Grundton der Gabel taub sind, für die Obertöne aber nicht, müssten es bemerken, wenn man die Gabel an ihr Ohr hält, da sie die Obertöne hören müssten. Da sie aber von dem Vorhandensein der tönenden Gabel an ihrem Ohre keine Ahnung haben, so schliesst BEZOLD, können auch keine Obertöne da sein. Dieser Schluss wäre nur dann zwingend, wenn die Resonanztheorie bereits bewiesen wäre. Die von BEZOLD benutzten Gabeln sind schwerlich

¹ Eine Erklärung durch Differenztöne kann ich nicht gelten lassen, so lange letztere nicht selbst erklärt sind.

² *Zeitschr. f. Psychol.* Bd. XIII, S. 161 ff., 1897.

obertonfrei, denn von STUMPF ist festgestellt worden, dass tiefere EDELMANN'sche Gabeln ausser dem Grundtone die Oktave zweifellos hervorbringen. BEZOLD versucht nun noch einen zweiten Beweis für die Behauptung, dass die Gabeln obertonfrei seien. Man soll dies nämlich der Schwingungskurve (a. a. O., S. 163) ansehen können. Ich muss allerdings gestehen, dass ich mir kein Urtheil darüber zutrauen würde, ob diese Kurve aus absolut einfachen Pendelschwingungen besteht oder eine schwächere Oktave enthält. Doch wenn selbst durch Ausmessung festgestellt werden könnte, dass diese Kurve eine obertonfreie Schwingung darstellt, so würde dies gegen STUMPF's positiven Nachweis des zweiten Theiltons nichts verschlagen, denn dieser könnte immerhin erst bei der Uebertragung der Gabelschwingung auf die Luft in letzterer entstehen, was praktisch denselben Erfolg hat, als wenn er bereits in der Schwingung der Stimmgabel enthalten ist.

Die Oktave ist also physikalisch vorhanden, nur ist es unmöglich, sie ohne besondere Hilfsmittel herauszuhören; ihre Empfindung wird durch den starken tieferen Ton verhindert. (Weshalb dies geschieht, werde ich später zeigen.) Nun giebt es ausser den von STUMPF vorzugsweise benutzten Schwebungen noch andere Mittel, die Oktave hörbar zu machen. Man braucht nur den Grundton durch Interferenz zu vernichten. Was man durch Interferenz erlangt, dass nämlich keine Empfindung des tieferen Tones eintritt, kann man aber in gewissen pathologischen Fällen auch ohne jeden Apparat erreichen. Man nimmt einen Patienten, dessen Resonator für den Grundton zerstört, dessen Resonator für den Oberton erhalten ist, und hält ihm die tönende Gabel an das Ohr. Dann kann die Empfindung des Grundtons nicht zu Stande kommen, wohl aber die des Obertons. BEZOLD hat nun diesen Versuch gemacht und fand, „dass die Kranken, wenn wir nur das Auge ausschliessen, keine Ahnung davon haben, ob überhaupt die in starke Schwingung versetzte Gabel direkt vor dem Ohre sich befindet oder nicht.“ Dann kann es auch keine Resonatoren im Ohre geben; denn wenn es solche gäbe, hätten die Kranken die Oktave hören müssen.

Neue Theorie des Hörens.

Man muss von einer Theorie der Gehörsempfindungen vornehmlich verlangen, dass sie eine Erklärung giebt, wie es kommt, dass man aus einem zusammengesetzten Klange diejenigen Töne (Primär- und Differenzttöne) heraushört, die man, wie die Beobachtung zeigt, bei bestimmter Stärke der Primärtöne thatsächlich heraushört. Ich glaube nun, dass man dieser Forderung schwerlich auf andere Weise genügen kann, als dadurch, dass man eine Zerlegung der Tonwelle im Ohre annimmt, wie ich sie in meiner früheren Abhandlung dargestellt habe, wobei zunächst die kleinsten Hinundherbewegungen ihre Wirksamkeit verlieren, dann die etwas grösseren u. s. w. Nur auf diese Weise erhält man eine Reihe an Frequenz abnehmender Hinundherbewegungen, wie sie den in Wirklichkeit gehörten Primär- und Differenztönen entsprechen. Um nun diesen Vorgang anschaulich zu machen, habe ich damals direkt an der Kurve eine Zerlegungskonstruktion ausgeführt. Doch ist diese nicht so übersichtlich wie die jetzt von mir erdachte Konstruktion und kann auch zu Missverständnissen Anlass geben. So ist mir zum Vorwurf gemacht worden, dass ich die bei der Zerlegung sich ergebenden Stücke willkürlich mit Tonschwingungen identifizierte. Dies ist jedoch gar nicht der Fall. Ich habe diese Theile „Schwingungen“ genannt, weil sie wirkliche Hinundherbewegungen (nur nicht pendelförmige) darstellen. Im Uebrigen wird durch diesen Namen gar nichts behauptet. Um eine Möglichkeit zu zeigen, wie eine solche Wellenzerlegung thatsächlich geschehen kann, habe ich damals angenommen, dass die Schwingungen sich innerhalb der Schnecke mit starker Dämpfung in irgend einem Körper fortpflanzen, der mit den nervösen Endorganen in Verbindung steht. Diese Annahme begegnet einer Schwierigkeit, weil man nicht recht zu sagen vermag, welcher der anatomisch in der Schnecke festgestellten Körper es sein kann, in dem die Schwingungen gedämpft fortschreiten. Ich erwähnte damals die Corti'schen Bögen, ohne aber selbst recht von einer derartigen Funktion dieser Theile überzeugt zu sein. Schon damals wäre ich zu der einfachen gleich auseinander zu setzenden Anschauung gelangt, wenn es mir schon damals gelungen wäre, mich gänzlich von der Resonanz zu emanzipiren.

Darüber herrscht allgemeine Uebereinstimmung, dass ein Druck des Steigbügels auf das Vorhofswasser die Wassersäule der Vorhofstreppe nicht in ihrer Längsrichtung so verschiebt, dass die verdrängte Wassermenge durch die an der Spitze der Schnecke gelegene Kommunikationsöffnung auf die Paukentreppe überfließt, sondern dass in einem solchen Falle wegen der auf diesem längeren Wege dem Wasser sich entgegenstellenden Reibungswiderstände die membranösen Wände des häutigen Schneckenkanals gegen die Paukentreppe hin sich buchten. Die Resonanztheorie wird hier inkonsequent, indem sie annimmt, dass diese Ausbuchtung stets an derjenigen Stelle stattfindet, wo sich der angebliche auf den betreffenden Ton abgestimmte Resonator befindet. Will man die allgemeine Annahme konsequent durchführen, so muss man sagen: Da der längere Weg der Flüssigkeit einen grösseren Reibungswiderstand entgegengesetzt, so buchten sich die Membranen des Schneckenkanals dort aus, bis wohin die Flüssigkeit den kürzesten Weg zurück zulegen hat, also am Anfange der Schnecke. Je grösser die durch den Steigbügel verdrängte Flüssigkeitsmenge ist, um so weiter erstreckt sich der in Bewegung gerathene Theil der Membranen, da die Ausbuchtung doch wahrscheinlich nur in geringerer Tiefe möglich ist; und bei äusserst starken Tönen dürften wohl die membranösen Wände in ihrer ganzen Länge sich ausbuchen. Es wird kaum Jemand leugnen können, dass diese Annahme rein den anatomischen Befunden nach eine viel grössere Wahrscheinlichkeit hat, als jene andere, dass die Basilar-membran aus vielen Tausenden Resonatoren bestehe.

Sehr wahrscheinlich ist es ferner, dass die membranösen Wände des Schneckenkanals als weiche, in Flüssigkeit gebettete organische Körper, wenn sie aus ihrer normalen Lage durch äussere Kräfte verrückt worden sind, nur verhältnissmässig langsam wieder in den alten Zustand zurückkehren werden, falls dies nicht wiederum durch äussere Kräfte geschieht. Und zwar können wir ohne Schwierigkeit annehmen, dass die Zeit der selbständigen Rückkehr in den früheren Zustand mehrere Sekunden beträgt, gegenüber der Zeit einer Hinundherbewegung des Steigbügels also im Allgemeinen sehr gross ist, so dass wir in der Anwendung dieser Voraussetzung auf besondere Fälle keinen nennenswerthen Fehler machen werden, wenn wir annehmen, dass die Membran überhaupt nur durch äussere Kräfte bewegt wird.

Ebenso, wie bei einer positiven Bewegung des Steigbügels die Ausbuchtung der Basilarmembran am Anfange der Schnecke beginnt und sich bei fortschreitender Bewegung des Steigbügels immer weiter nach der Spitze der Schnecke hin ausbreitet, muss bei der Umkehr des Steigbügels die Rückbewegung der Membran vom Anfange der Schnecke beginnend nach der Spitze hin sich weiter verbreiten.

Hierzu will ich noch eine Voraussetzung machen, die keine wesentliche Bedeutung hat, die Konstruktion des Bewegungsbildes jedoch bedeutend vereinfacht. Ich will nämlich annehmen, dass die Rückbewegung der Membran nicht über ihre normale Lage hinaus stattfindet. Wegen des unsymmetrischen Baues der Basilarmembran (nur auf Einer Seite lagern festere Gebilde) ist es übrigens gar nicht unwahrscheinlich, dass die Membran wirklich nur nach Einer Seite hin sich bewegt. Macht nun der Steigbügel, wie es am Anfange einer akustischen Erregung häufig der Fall sein dürfte, eine negative Bewegung von so grosser Amplitude, dass mehr Flüssigkeit angesaugt wird, als in der Ausbuchtung der Membran enthalten ist, so muss, sobald sämtliche aus ihrer normalen Lage verrückten Membrantheilchen diese wieder erreicht haben, ein Ueberfliessen der Flüssigkeit durch die an der Schneckenspitze gelegene Oeffnung eintreten. Letzteres muss auch dann geschehen, wenn bei Einwirkung von überaus starken Tönen selbst eine Ausbuchtung der ganzen Membran die verdrängte Flüssigkeitsmenge nicht fassen kann. Diese die Vorhofs- und Paukentreppe direkt verbindende Oeffnung hat demnach die Funktion eines Sicherheitsventils, durch das einem Zerreißen der Basilarmembran vorgebeugt wird.

Weitere Hypothesen mache ich nicht, denn hiemit ist bereits so ziemlich alles erklärt, was überhaupt zu erklären ist. Man kann dies an den Figuren sehen, die uns eine Anschauung davon geben, wie in speziellen Fällen die einzelnen Theile der Schneckenmembran in Bewegung gerathen müssen. Die senkrecht auf einander folgenden Felder bedeuten einzelne Theilchen der Schneckenmembran, und zwar liegen diese Theilchen bei 1 am Anfange der Schnecke; je grösser die Zahlen werden, um so mehr nähern sich die zugehörigen Theilchen der Basilarmembran der Schneckenspitze, ohne dass jedoch das letzte Figurenfeld dem äussersten Ende der Membran zu entsprechen brauchte, vielmehr kann es noch ein grösseres oder kleineres Stück davon

entfernt bleiben; dieser an der Schneckenspitze gelegene Theil der Basilarmembran bleibt in diesem Falle eben unthätig. Je länger der in Bewegung versetzte Theil der Basilarmembran ist, um so grösser muss natürlich auch die Zahl der erregten Nervenendigungen sein. Da nun aber der in Bewegung versetzte Theil der Basilarmembran um so länger sein muss, je grösser die Amplitude der Steigbügelschwingung, also auch der Luftschwingung ist, so folgt aus unseren Voraussetzungen, dass die Intensität der Tonempfindungen abhängig ist von der Zahl der gereizten Nervenendigungen.

Gehen wir in einem der Figurenfelder von links nach rechts, entsprechend den Buchstaben *a, b, c* u. s. w., so sehen wir, wie die Bewegungen dieses Membrantheilchens der Zeit nach auf einander folgen. Jeder Uebergang vom Weissen zum Schwarzen bedeutet eine positive, vom Schwarzen zum Weissen eine negative Bewegung; in den Zwischenzeiten befindet sich das Theilchen in Ruhe. Die gesammte so dargestellte Zeit entspricht einer Periode der zusammengesetzten Tonschwingung, so dass wir, rechts an der Grenze des Feldes angekommen, sofort wieder links am Anfange einsetzen müssen.

Die Konstruktion ist in sehr einfacher, wenn auch nicht müheloser Weise auszuführen. Man konstruirt zuerst die zusammengesetzte Kurve, z. B. Fig. 2 meiner früheren Abhandlung:

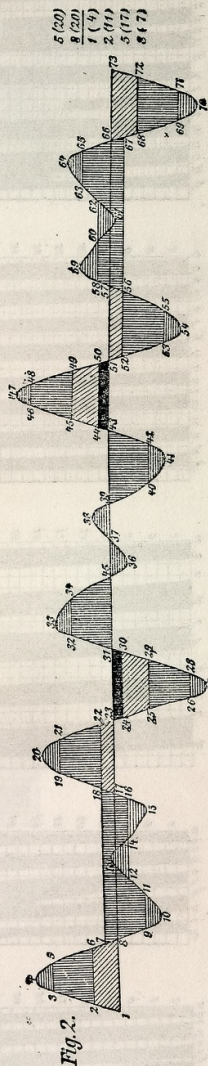


Fig. 2.

(Aus Zeitschr. f. Psych. XI, S. 218.)

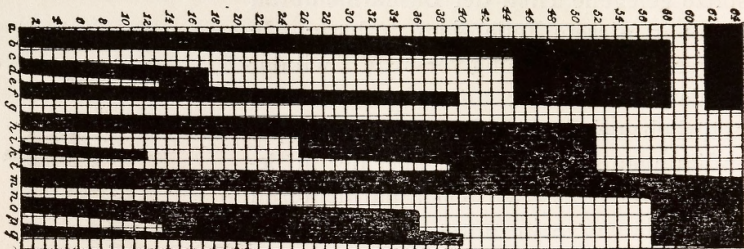


Fig. 1.

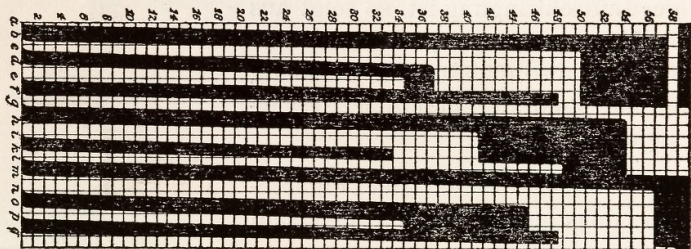


Fig. 2.

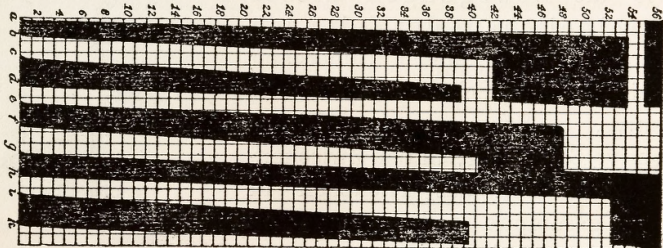


Fig. 3.

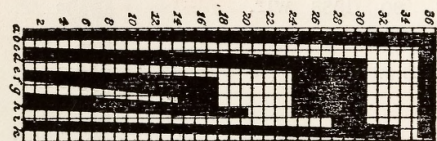


Fig. 4.

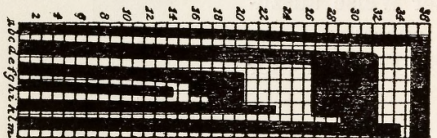


Fig. 5.

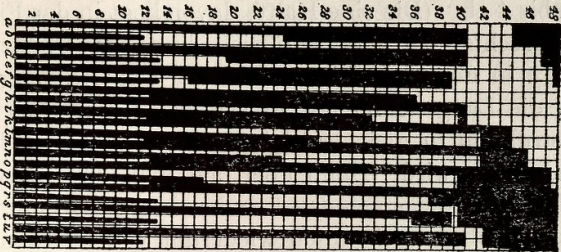


Fig. 6.

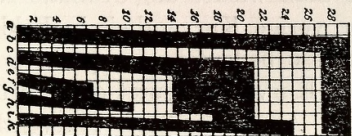


Fig. 9.

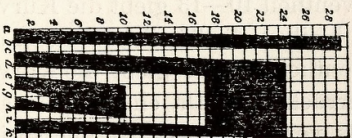


Fig. 10.

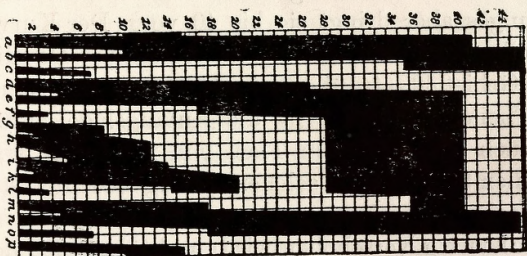


Fig. 11.

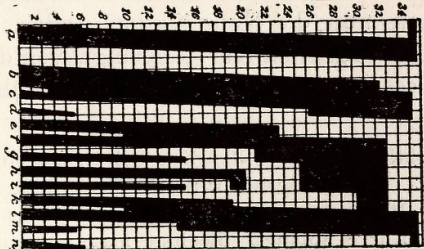


Fig. 12.

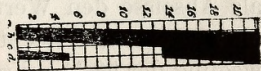


Fig. 7.



Fig. 8.

Ihr entspricht in dieser Abhandlung Fig. 1. Nun zeichnet man den Kurventheil 70 bis 4 ab. (Die eine Hälfte davon liegt in der Figur ganz am Ende rechts, ist aber natürlich links zu ergänzen.) Dieser Theil ist *a* in der neuen Figur. Bei der Uebertragung ist es vortheilhaft, die Längeneinheiten zu verändern (natürlich für die ganze Konstruktion in gleicher Weise), damit die neue Figur weniger breit als hoch wird. Dann überträgt man den Kurventheil 4—10, aber in entgegengesetzter senkrechter Richtung, so dass man statt von oben nach unten wiederum von unten nach oben steigt. Als Anfang nimmt man wieder die Ordinate Null, als Abscisse den Werth, den der vorige Kurventheil in Feld 58 als äussersten erreicht hat. Kurve *a* bedeutet eine positive Bewegung der 58 Membrantheilchen. Kurve *b* bedeutet eine Zurückbewegung der Membrantheilchen. Aber, da dieser Kurventheil kürzer ist als *a*, so bleiben die Membrantheilchen 45—58 noch in ihrer verrückten Lage. Der Kurventheil 10—13 giebt die Kurve *c*, 13—15 die Kurve *d*. Auch hier bleiben die Theilchen 14—17 in der verrückten Lage. Der Kurventheil 15—20 giebt die Kurve *e*. Diese bedeutet eine positive Verrückung. Da eine solche aber bei den Theilchen 14—17 bereits vorhanden ist, so überspringt sie dieses Gebiet. Kurve *e* sollte eigentlich nur bis 36 reichen; wegen dieses Sprunges aber dringt sie bis 40 vor. Der Kurventheil 20—27 (*f*) sollte eigentlich nur bis 56 reichen. Da diese Kurve jedoch das Gebiet 40—44 überspringt, so kann sie sämtliche verrückten Theilchen bis 58 in die Anfangslage zurückführen; und da auch jetzt noch ein Theil von ihr übrig ist, so macht sie noch einen Sprung (ein solcher Sprung bedeutet stets, dass die Flüssigkeit im Schneckenkanal an dieser Stelle nur in der Längsrichtung verschoben wird) und führt auch noch die von früher her (bei *b*) verrückten Theilchen 62—64 zurück. Auf diese Weise führt man nun die Konstruktion weiter, bis man zu dem Punkte der ursprünglichen Kurve gelangt, von dem man ausgegangen ist.¹ Dass schliesslich weder ein Rest übrig

¹ Ich habe meine Konstruktionen ganz willkürlich bei irgend einem Minimum der Kurve begonnen. Am leichtesten wird die Herstellung der Figur, wenn man beim tiefsten Minimum (z. B. in Fig. 2 der früheren Abhandlung beim Punkt 27) der Kurve anfängt. Beginnt man bei einem andern Punkte, so muss man manchmal, an der rechten Seite angekommen, wieder auf die linke übergehen und hier die nöthigen Ergänzungen machen.

bleibt noch ein Stück fehlt, zeigt uns, dass in der Konstruktion kein Versehen vorgekommen ist.

Folgende Tabelle giebt eine Uebersicht über die Zusammensetzung der den Figuren zu Grunde liegenden Schwingungskurven:

Figur:	1	2	3	4	5	6	7 und 8	9 und 10	11 und 12
Verhältniss d. Schwingungszahlen	5:8	5:8	5:8	5:6	5:6	10:21	$n:2n:$ $(2n+d)$	$4n:$ $(5n+d)$	$4n:(5n+d):$ $(15n+3d):$ $16n$
Verhältnisszahlen der Amplituden	1:1	1:3	3:1	2:1	1:2	1:1	2:1:1	1:1	2:2:1:1

Die Figuren 1, 2 und 3 zeigen uns dasselbe Intervall 5:8. Wenn wir in Fig. 1 die Felder 1 bis 11 von links nach rechts verfolgen, so treten wir achtmal in nicht sehr verschiedenen Abständen von Weiss auf Schwarz hinüber, d. h. die entsprechenden Theilchen der Basilarmembran machen während der Periode achtmal nach nicht genau gleichen, aber auch nicht zu sehr verschiedenen Zeitabschnitten eine positive Bewegung. Nehmen wir nun, um bei möglichst einfachen Vorstellungen zu bleiben, an, eine jede solche Bewegung sei ein Reiz für die anliegenden Nervenendigungen, so müssen diese die Empfindung des Tones 8 vermitteln. Von den durch den Uebergang von Schwarz auf Weiss bezeichneten negativen Bewegungen nehme ich an, dass sie auf den Nerven ohne Einfluss bleiben. Es ist demnach gleichgültig, ob die schwarzen Felder grössere oder geringere Breite haben. Nur die linksseitige Begrenzung der schwarzen Felder ist für uns von Wichtigkeit, da durch sie der jedesmalige Zeitpunkt bezeichnet wird, in dem ein Reiz zur Wirkung gelangt.

Wir müssen nun freilich voraussetzen, dass dieselbe (einer gewissen Zahl von Reizungen während der Periode entsprechende)

Empfindung zu Stande kommt, wenn die Reize in etwas unregelmässigen Zeitabschnitten sich wiederholen, als wenn sie ganz regelmässig erfolgen. Doch ist es selbstverständlich, dass die Unregelmässigkeit eine gewisse Grenze hat. Wenn beispielsweise in einer Periode 20 Reize in ziemlich gleichen und darauf 20 in unter sich zwar auch gleichen, aber doppelt so grossen Abschnitten, als die früheren, aufeinanderfolgen würden, so können wir nicht annehmen, dass dann der Ton 40 entstehen muss, sondern dass im ersten Theile der Periode von denselben Nerven der Ton 60 (wegen der Schnelligkeit der Reizfolge), im zweiten Theile die tiefere Oktave 30 zur Empfindung gebracht wird. Die Grenze, innerhalb deren die Unregelmässigkeit der Reizfolge ohne Einfluss ist, kann allerdings nicht a priori bestimmt werden, sondern muss durch Beobachtung von speziellen Fällen ermittelt werden.

Bei dem Intervall 5:8 werden die Töne 8, 5, 2, 1 und, wenn 8 für sich allein stärker ist als 5, auch 3 gehört. Der Ton 8 erklärt sich aus Fig. 1, wie wir gesehen haben, sehr leicht; ebenso der Ton 5, denn bei den Theilchen 14 u. s. w. der Membran folgen während der Periode 5 Reize auf einander. Bei den Theilchen 12 und 13 haben wir freilich nur 7 Reize, und diesen Ton hört man nicht. Doch sind die beiden Reize *g* und *l* fast doppelt so weit von einander entfernt, als die übrigen. Es ist also ziemlich dasselbe, als wenn man bei einer Sirenen-scheibe von 8 Löchern immer eins verstopft. Dann hört man doch den Ton 8, also wird auch wohl hier bei der Reizfolge 12 und 13 der Ton 8 zu Stande kommen. Die Stärke des Tones 8 wäre dann insgesamt $\frac{1}{3}\frac{3}{4}$ oder 20 % des Gesamtklages, während objektiv die Amplituden von 8 und 5 gleich sind. Bei den Membrantheilchen 40—57 sehen wir während der Periode 2 Reize auf einander folgen, bei 58—64 nur 1 Reiz. So erklären sich die Differenztöne 2 und 1. Sie stellen zusammen $\frac{2}{3}\frac{5}{4}$ oder 39 % des Gesamtklages dar.

In Fig. 2, wo der Ton 8 objektiv dreimal so stark ist als 5, ergibt sich als Stärke des empfundenen Tones doch nur $\frac{3}{4}\frac{4}{5}$ oder 58 % des Gesamtklages. Die Differenztöne 1 und 2 entstehen hier bei den Theilchen 49 bis 59, ihre Stärke beträgt also zusammen $\frac{1}{3}\frac{1}{9}$ oder 19 % des Gesamtklages. Sehr bemerkenswerth ist der Unterschied, dass bei Fig. 2 der obere, für die Differenztöne 1 und 2 in Betracht kommende Theil einen sehr viel geringeren

Theil des Ganzen bildet, als in Fig. 1 bei objektiv gleicher Stärke der Primärtöne. In Fig. 3 ist objektiv der Ton 5 viel stärker als 8. Wir sehen hier von einer achtmaligen Reizung nichts. Wie ich nun oben berichtet habe, hört man, falls der Ton 8 nur objektiv vorhanden ist, wenn er auch beim Zusammenklange nicht herausgehört werden kann, doch die Differenztöne 2 und 1. Dementsprechend haben wir hier bei den Theilchen 40 bis 53 eine zweimalige, 54 bis 56 eine einmalige Reizung während der Periode. Die Stärke des empfundenen Tones 5 ist in diesem Falle $\frac{3}{8}$ oder 70 %, die der Differenztöne 2 und 1 zusammen $\frac{1}{8}$ oder 30 % des Gesamtklangeres; objektiv ist der Ton 5 dreimal so stark als 8. Der Differenzton 3 ist in diesem Falle nicht zu hören, wohl aber in dem der Figur 1 entsprechenden. Wenn wir die beiden Figuren mit einander vergleichen, so sehen wir leicht, dass uns kaum etwas Anderes übrig bleibt, als in Fig. 1 aus der eigenthümlichen Bewegungsform der Theilchen 14 bis 39 sowohl den Ton 5 als 3 herauszulesen. Die Annahme freilich lehne ich von vornherein ab, dass etwa bei diesen Theilchen dieselben Nervenendigungen gleichzeitig den Ton 5 und 3 vermittelten. Vielmehr können nur einzelne 5, andere 3 zur Empfindung bringen. 5 ist ja sehr leicht erklärt, denn wir haben überall von 14 bis 39 fünf auf einander folgende Reizungen. Um den Ton 3 zu erklären, müssen wir annehmen, dass bei einzelnen Theilchen zweimal je zwei Reizungen ihrer Wirkung nach zu einer einzigen verschmelzen. Dass dies unmöglich sei, wird wohl Niemand behaupten. Ich weise bei dieser Gelegenheit auf die in meiner früheren Abhandlung veröffentlichten Versuche mit unregelmässig auf einander folgenden Luftstößen bei Sirenscheiben hin. Man macht dabei manchmal ganz seltsame, schwer zu erklärende Beobachtungen, jedenfalls nicht weniger schwer, als hier das Hören des Tones 3. Weshalb aber zwei Reize zu einem verschmelzen, darüber kann ich in unserem Falle eine bestimmte Aussage noch nicht machen, blosser Vermuthungen aber möchte ich mich lieber enthalten.

Die Figuren 4 und 5 zeigen uns das Intervall 5 : 6. In Figur 5, wo der Ton 6 objektiv an Stärke überwiegt, sehen wir bei den Feldern 1 bis 13 sechs Reizungen in der Periode, bei 14 bis 17 fünf Reizungen, bei 18 bis 23 vier Reizungen, bei 24 bis 29 drei, bei 30 bis 33 zwei, bei 34 bis 36 Eine Reizung. Diese Töne werden auch alle gehört, mit Ausnahme von 2, den ich wenig-

stens mit Sicherheit nicht festzustellen vermochte. Doch ist in diesem Falle die Verschmelzung zweier Reize zu einem einzigen sehr leicht zu erklären, da sie verhältnissmässig ausserordentlich nahe an einander liegen, in den Feldern 30 und 31 der Fig. 5 bei *a* und *c*, in den Feldern 32 und 33 bei *l* und *a*. In Fig. 4, wo der Ton 6 objektiv viel schwächer ist als 5, sehen wir einen sechsmaligen Reiz überhaupt nicht entstehen, wohl aber die den Differenztönen 4, 3 und 1 entsprechenden Reizfolgen. In den Feldern 21 bis 23 von Fig. 4 haben wir drei Reizungen und können daher annehmen, dass hier der Ton 3 entsteht. Andererseits jedoch muss man bedenken, dass die drei Reize *i*, *a* und *c* sehr nahe an einanderliegen, dass dann aber eine Pause folgt. Es ist also ähnlich, als wenn wir bei einer Sirenen Scheibe von vier Löchern immer eines verstopfen; in diesem Falle hört man doch den Ton vier. Wir können also annehmen, dass auch hier nicht der Ton 3, sondern 4 zur Empfindung gelangt. Dies eben ist die Zweideutigkeit des Reizes, von der ich früher sprach, durch die eine abwechselnde Verstärkung bald von 3, bald von 4 beim Intervall 5 : 6 ermöglicht wird. Welches freilich die physiologischen Ursachen sein können, durch die bewirkt wird, dass dem zweideutigen Reize bald die eine, bald die andere Empfindung entspricht, darüber weiss ich nichts zu sagen. Aehnlich, wie hier sind die Verhältnisse beim Intervall 4 : 5 und andern.

Fig. 6 zeigt uns das Intervall 10 : 21, also in mittleren Lagen eine um ziemlich viel Schwingungen verstimmte Oktave. In den unteren Feldern sehen wir 21 Reizungen während der Periode auf einander folgen. Der Ton 21 müsste nun eigentlich, wie leicht aus der Figur zu ersehen ist, zweimal, in der Gegend von *e* und *s* schweben, weil die in kürzeren Zeitabschnitten sich wiederholenden Reize sich hier bis auf das Theilchen 13 hin erstrecken, bei dem in der Gegend von *a* und *m* die Reizungen nach doppelt so langen Zeiten auf einander folgen. Er schwebt aber, wenn keine Obertöne vorhanden sind, wie ich gezeigt habe, überhaupt nicht. Es handelt sich jedoch in diesem Falle auch nur um sehr geringe Stärkeschwankungen, die wahrscheinlich zu gering sind, um bemerkt werden zu können. Wir erhalten also bei den Theilchen 1 bis 12 den Ton 21, 13 bis 40 den Ton 10 und bei 41 bis 48 den Differenzton 1, wie er in diesem Falle thatsächlich zu beobachten ist.

Die Figuren 7 und 8 zeigen uns den Vorgang bei einem nur ganz minimal verstimmtten Oktavenintervall (wo also kein Differenzton entsteht), wenn der tiefere Ton die Oktave als Oberton enthält. In diesem Falle (etwa beim Intervall 500 : 1001) kann ich natürlich nicht die ganze Periode aufzeichnen. Wir brauchen aber auch, um uns den Vorgang anschaulich darzustellen, nur die beiden charakteristischen Phasen, die, wenn der höhere Ton um 1 Schwingung verstimmt ist, nach Verlauf von $\frac{1}{2}$ Sek. sich immer ablösen. Diese beiden Phasen sehen wir nun in Fig. 7 und 8. In Fig. 7 erstrecken sich die Reizungen des höheren Tons über 5 Felder, die des tieferen über 17. In Fig. 8 sind die Reizungen des höheren Tons gänzlich verschwunden, die des tieferen erstrecken sich über 12 Felder. Beide Töne müssen also schweben, aber der höhere auffallender, weil er abwechselnd auftritt und wieder verschwindet, während der tiefere nur abwechselnd stärker und schwächer wird.

Beim verstimmtten Intervall 4 : 5 hört man, wie ich festgestellt habe, wenn keine Obertöne vorhanden sind, keine Schwebungen des Differenztons 1. Wenn solche zu Stande kämen, so könnte dies nur dadurch geschehen, dass die objektiven Töne mit beständig sich ändernder Phase zusammenklingen. Man kann in diesem Falle vier charakteristische Phasen unterscheiden, die, wenn der höhere Ton um 1 Schwingung verstimmt ist, in Abständen von $\frac{1}{4}$ Sek. auf einander folgen, zusammen also eine Viertelsekunde ausfüllen. Fig. 9 bringt uns die erste, Fig. 10 die zweite dieser Phasen zur Anschauung. Die dritte und vierte erhält man fast genau, wenn man in diesen beiden Figuren Weiss und Schwarz mit einander vertauscht. Wir überzeugen uns ohne Weiteres, dass diese Phasenverschiebung keine bemerkenswerthe Klangänderung zu bewirken im stande ist. Ein ganz anderes Bild zeigen uns die Figuren 11 und 12, die ebenfalls das verstimmtte Intervall 4 : 5 darstellen, wobei aber zu 4 der Oberton 16, zu 5 der Oberton 15 hinzugefügt ist. Hier kann man zwei charakteristische Phasen unterscheiden, die, wenn der Ton 5 um 1 Schwingung verstimmt ist, in Abständen von $\frac{1}{4}$ Sek. auf einander folgen, zusammen eine Viertelsekunde ausfüllen, sodass also der ganze Vorgang sich viermal in der Sekunde wiederholt, entsprechend den 4 Schwebungen des Differenztons 1, die man in diesem Falle hört. In Fig. 11 kommt der Differenzton 1 in mehr als 10 Theilchen von 36—46 zu Stande, in Fig. 12

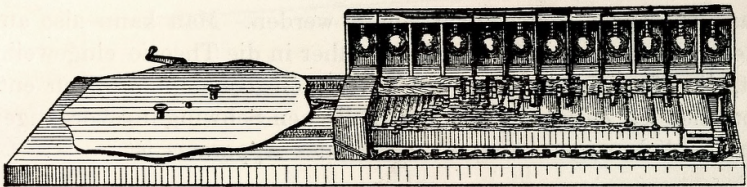
dagegen nicht einmal ganz in einem einzigen, 35. Wir haben also hier die Schwebungen des Differenztons direkt erklärt, ohne in der Annahme von allerlei mit einander schwebenden Differenztönen unserer Phantasie freien Spielraum lassen zu müssen.

Ich habe im Vorstehenden meine Theorie auf eine Anzahl spezieller Fälle angewandt, die mir in der einen oder andern Hinsicht besonders merkwürdig waren. Mir scheint die Uebereinstimmung der Theorie mit den Thatsachen in allen diesen Fällen eine recht gute zu sein. Doch dürfte die Theorie, wenn sich ihre Grundvoraussetzung als richtig erwiese, jedenfalls in den Einzelheiten einen weiteren Ausbau erfordern. Vor Allem aber bedarf das Thatsachenmaterial, das durch die Theorie erklärt werden soll und auf das sich jede Theorie daher zu stützen hat, noch einer recht ausgiebigen Erweiterung durch neue Beobachtungen. Am meisten muss man wohl nach der bisherigen Darstellung meiner Theorie an den daraus folgenden Intensitätsverhältnissen Anstofs nehmen. Für die Differenztöne scheint aus der Theorie doch eine grössere relative Stärke sich zu ergeben, als sie in Wirklichkeit zu beobachten ist, und die Abschwächung des höheren Primärtons eines Zweiklanges scheint auch nicht so bedeutend zu sein, als die Theorie erwarten lässt. Doch das muss ich betonen, dass die obigen Intensitätsbestimmungen auf der stillschweigend gemachten Voraussetzung beruhen, dass die Nervenendigungen in gleicher Dichtigkeit der Länge nach über die Basilarmembran verbreitet sind, und dass die Länge des ausgebuchteten Theiles der Membran stets proportional ist der Weite der betreffenden Schwingungsbewegung des Steigbügels. Wie weit die erstere Annahme erfüllt ist, kann man bei unserer mangelhaften anatomischen Kenntniss der Schnecke nicht sagen; die zweite ist aber sicherlich nicht erfüllt, da der Querschnitt des Schneckenkanals keineswegs vom Anfange bis zur Schneckenspitze der gleiche ist. Ich werde auf diesen Punkt in einer weiteren Abhandlung näher eingehen und hoffe zeigen zu können, dass meine Theorie nicht nur die Qualitäten, sondern auch die Intensitäten in vollkommenerer Weise als die Resonanztheorie zu erklären vermag.

Anhang I.

Ueber einen Apparat zur Demonstration der Wellenzerlegung durch das Gehörorgan.

Man hat bekanntlich, um die Eigenthümlichkeit der Wellenbewegung zu verdeutlichen, allerlei Wellenmaschinen construirt, die einen der Wellenbewegung analogen Vorgang vor dem Auge des Betrachtenden vorüberziehen lassen. Zu ähnlichem Zwecke, um nämlich die durch Einwirkung einer beliebigen akustischen Welle auf das Ohr meiner Theorie gemäß bewirkte verschieden frequente Reizung der Nervenendigungen in der Schnecke in ganz langsamer Aufeinanderfolge darzustellen, habe ich einen Apparat construirt, dessen Einrichtung und Function ich kurz beschreiben möchte.¹



Wie die Figur zeigt, enthält der Apparat eine Reihe (12) Glühlämpchen, die eine Reihe von Nervenendigungen in der Schnecke vertreten sollen. Die in der Figur sichtbare eiserne Scheibe, die mittelst einer Schraube ohne Ende langsam gedreht werden kann, enthält an der Peripherie eine Curve, die zusammengesetzt ist aus zwei ein Nonenintervall (4 : 9) bildenden Sinusschwingungen. Da die Scheibe leicht auswechselbar ist, so kann jedoch auch jede beliebige anders zusammengesetzte Curve angewandt werden. Der die Wellenzerlegung bewirkende Mechanismus besteht aus zwölf beweglichen Holzrahmen (entsprechend den zwölf Lämpchen), von denen jeder einen eigenthümlich gebauten Schleifkontakt trägt.

Die Holzrahmen, die durch Drehung der Curvenscheibe bewegt werden, sind so eingerichtet, daß eine kleine (positive

¹ Der Apparat befindet sich im Psychologischen Seminar zu Berlin und kann dort in Augenschein genommen werden.

oder negative) Steigung der Curve nur den bezw. die ersten Rahmen in (positive oder negative) Bewegung versetzt und damit ein Erglühen oder Erlöschen der zugehörigen Lämpchen veranlaßt. Je gröfser die Steigung der Curve ist, um so gröfser ist auch die Zahl der bewegten Rahmen und damit der zum Erglühen bezw. Erlöschen gebrachten Lämpchen. Dies entspricht insofern der Bewegung der Basilarmembran, als durch eine kleine Hin- und Herbewegung des Steigbügels nur der am Anfange gelegene Theil der Basilarmembran in Bewegung versetzt und so auf die hier lagernden Nervenendigungen ein Reiz ausgeübt wird, während durch gröfsere Hin- und Herbewegungen des Steigbügels auch weiter nach der Schneckenspitze hin gelegene Theile der Basilarmembran bewegt werden.

Dreht man nun die Scheibe mit der Curve (4:9) einmal herum, so sieht man die ersten Lämpchen neunmal, die weiter folgenden viermal und die letzten einmal erglühen, entsprechend den drei Tönen, die bei Einwirkung einer solchen Luftwelle auf das Gehörorgan thatsächlich gehört werden. Man kann also auf diese Weise auch dem, der nicht näher in die Theorie eingeweiht ist, die Möglichkeit einer den wirklichen Tonempfindungen entsprechenden Zerlegung des physikalischen Schwingungsvorganges anschaulich zeigen, was der Zweck des Apparates ist.

Anhang II.

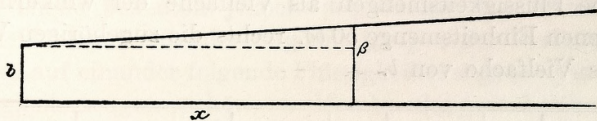
Erweiterung der Theorie des Hörens.¹

In der obigen Darstellung der Theorie war vorausgesetzt worden, dafs die Nervenendigungen in gleicher Dichtigkeit der Länge nach über die Basilarmembran ausgebreitet seien, und dafs die von einer Querfaser der Membran bei der Einwirkung einer Tonschwingung beschriebene Fläche am Anfange der Schnecke ebenso groß sei wie an der Spitze der Schnecke und

¹ Die folgende Ableitung geht nicht etwa von einer der Theorie hinzugefügten Hypothese aus, sondern ist eine Berücksichtigung der thatsächlichen, wenn auch noch nicht mit großer Genauigkeit und Zuverlässigkeit festgestellten anatomischen Befunde.

an jeder anderen Stelle der Membran. Diese letztere Voraussetzung entspricht, wie schon früher erwähnt wurde, zweifellos nicht der Wirklichkeit, da die Membran an Breite nach der Schnecken- spitze hin beträchtlich zunimmt. Im Folgenden wird nun dar- gestellt, welche Wirkung die verschiedene Breite der Membran der neuen Theorie zufolge auf die Intensität der Töne haben muß.

Wir wollen voraussetzen, die Basilmembran nehme vom Anfange bis zur Schnecken- spitze gleichmäfsig um so viel zu, daß die grösste Breite sechsmal so groß ist als die geringste. Letztere sei gleich b . Die Länge der Membran sei gleich $150 b$. Diese Annahmen dürften nach den bisherigen Messungen der Membran einigermassen mit den wirklichen Verhältnissen übereinstimmen. Die Entfernung einer beliebigen Stelle der Membran vom An- fange sei x , die Breite der Membran an diesem Punkte β .



$$\text{Dann ist } \frac{\beta - b}{x} = \frac{6b - b}{150b} = \frac{1}{30}, \text{ also}$$

$$\beta = b + \frac{x}{30} = \frac{30b + x}{30}$$

Die von einer Querfaser der Membran bei der Bewegung aus der Ruhelage bis zur maximalen Ausbuchtung beschriebene Fläche sei am Anfange der Membran q , an einer beliebigen Stelle x . Machen wir über das Verhältniß von q und x die ein- fachste Annahme, daß nämlich diese Flächen ähnlich sind, so ist:

$$\frac{x}{q} = \frac{\beta^2}{b^2} = \frac{(30b + x)^2}{900b^2}$$

Die von einem ausgebuchteten Theile der Membran aufge- nommene Flüssigkeitsmenge f ist:

$$\begin{aligned} f &= \int_{x_1}^{x_2} x \, dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{q}{900b^2} (30b + x)^2 \, dx = \\ &= \frac{q}{2700b^2} [(30b + x_2)^3 - (30b + x_1)^3] \end{aligned}$$

Die gesammte in der Ausbuchtung der ganzen Membran Platz findende Flüssigkeitsmenge F erhalten wir, wenn wir $x_1 = 0$, $x_2 = 150b$ setzen:

$$F = \frac{q}{2700b^2} [(180b)^3 - (30b)^3] = 2150bq$$

Wir wollen nun berechnen, wie weit die Membran vom Anfange an sich ausbuchten muß, um die Flüssigkeitsmenge $50bq$ aufzunehmen. Dann ist $x_1 = 0$, x_2 die zu berechnende Unbekannte.

$$50bq = \frac{q}{2700b^2} [(30b + x)^3 - 27000b^3]$$

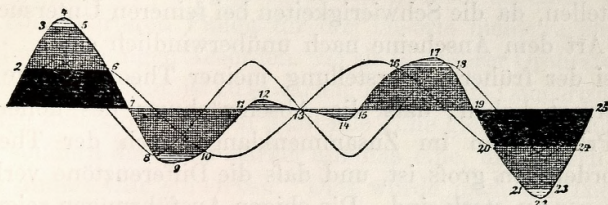
$$x = 24,514b$$

Auf dieselbe Weise können wir berechnen, wie weit die Membran vom Anfange an sich ausbuchten muß, um die Flüssigkeitsmengen $100bq$, $150bq$, $200bq$ u. s. w. aufzunehmen. Die folgende Tabelle zeigt uns die Ergebnisse der Rechnung. Links stehen die Flüssigkeitsmengen als Vielfache der willkürlich angenommenen Einheitsmenge $50bq$, rechts die zugehörigen Werthe von x als Vielfache von b .

f	x	f	x	f	x	f	x	f	x
1	24,51	11	84,78	21	111,98	31	131,50	41	147,18
2	36,72	12	88,10	22	114,18	32	133,20	42	148,60
3	45,60	13	91,24	23	116,31	33	134,88	43	150,00
4	52,77	14	94,22	24	118,38	34	136,51		
5	58,88	15	97,07	25	120,40	35	138,12		
6	64,24	16	99,80	26	122,36	36	139,70		
7	69,06	17	102,42	27	124,28	37	141,25		
8	73,45	18	104,94	28	126,14	38	142,77		
9	77,49	19	107,37	29	127,97	39	144,26		
10	81,25	20	109,71	30	129,75	40	145,73		

Ich will nun an einem Beispiel zeigen, wie obige Tabelle bei den theoretischen Intensitätsbestimmungen zusammengesetzter Klänge zu verwerthen ist. Von der durch den Steigbügel eines Ohres verdrängten Flüssigkeitsmenge kann angenommen werden, daß sie der Entfernung des Steigbügels aus seiner Ruhelage proportional sei. Nun mache der Steigbügel eine periodische

Schwingung, die zusammengesetzt sein soll aus den Sinusschwingungen des Quintenintervalls in gleichen Amplituden.



Um in diesem Falle ein Bild von der Bewegung der Basilar-membran zu erhalten, müssen wir zunächst die Schwingungs-curve nach den früher entwickelten Regeln zerlegen. Wir erhalten dann für die drei hörbaren Töne 3, 2 und 1 drei Amplitüdentheile, die sich ungefähr verhalten wie 2 : 9 : 8. Diese Theile bedeuten jedoch der wachsenden Membranbreite wegen nicht auf einander folgende Längen der Basilar-membran, sondern auf einander folgende Flüssigkeitsmengen. Die zu diesen Flüssigkeitsmengen gehörigen Membranlängen bestimmen wir nun aus der Tabelle auf folgende Weise.

Wenn wir als Flüssigkeitseinheit 50 *bq* annehmen, so erhalten wir als die zur Erzeugung des Tones 3 dienende Membranlänge 36,7 (da $x = 36,7$ für $f = 2$). Gehen wir um 9 Flüssigkeitsmengen weiter, so erhalten wir $x = 84,8$, als Membranlänge für den Ton 2 also $84,8 - 36,7 = 48,1$. Gehen wir nun um 8 Flüssigkeitsmengen weiter, so erhalten wir $x = 107,4$, als Membranlänge für den Ton 1 also $107,4 - 84,8 = 22,6$. Die zur Erzeugung der Töne 3, 2 und 1 dienenden Membranlängen verhalten sich daher ungefähr wie 37 : 48 : 23.

Wenn wir als Flüssigkeitseinheit 100 *bq* annehmen, d. h. wenn wir die physikalischen Töne auf das Ohr in demselben Stärkeverhältnifs, aber mit verdoppelter Amplitude einwirken lassen, so erhalten wir als Membranlängen für die drei Töne 3, 2 und 1 bezw. 52,8, $114,2 - 52,8 = 61,4$, $142,8 - 114,2 = 28,6$. Die zur Erzeugung der Töne 3, 2 und 1 dienenden Membranlängen verhalten sich also in diesem Falle ungefähr wie 53 : 61 : 29.

Das Stärkeverhältnifs der gehörten Töne würde hiernach nicht ganz unabhängig sein von der absoluten Intensität, mit der die Tonschwingungen auf das Ohr einwirken. Vielmehr

wird durch gröfsere absolute Tonintensität die relative Intensität der höheren Töne etwas begünstigt. Doch ist der Unterschied nicht so grofs, dafs man hoffen könnte, ihn durch Beobachtung festzustellen, da die Schwierigkeiten bei feineren Untersuchungen dieser Art dem Anscheine nach unüberwindlich sind.

Bei der früheren Darstellung meiner Theorie dürfte es Anstofs erregt haben, dafs die Abschwächung des höheren von zwei Primärtönen im Zusammenklange nach der Theorie so auferordentlich grofs ist, und dafs die Differenztöne verhältnismäfsig gar zu stark sind. Die obigen Ausführungen zeigen, dafs dieses auffällige Stärkeverhältnifs durch die Wirkung der verschiedenen Membranbreite derart modifizirt wird, dafs kaum noch Anstofs daran zu nehmen ist, zumal wenn man bedenkt, dafs die Gröfsenverhältnisse der Membran hier nur der Wahrscheinlichkeit nach angenommen sind, in Wirklichkeit aber noch andere sein können.

Falls die Basilmembran nicht bei allen Individuen in gleicher Weise gebaut wäre, sondern bei einigen gröfsere, bei anderen geringere Breitenunterschiede aufweisen würde, was keineswegs unwahrscheinlich ist, so würde dies nach der Theorie individuelle Unterschiede des Hörens zur Folge haben. Vor Allem würden Personen, bei denen die Zunahme der Membranbreite nicht so beträchtlich ist, die Differenztöne bei Weitem stärker hören als solche, deren Membran nach der Schneckenspitze zu sich stark verbreitert.

Dafs die Membran gerade am Anfange so sehr schmal ist, bringt unter Anderem den Vortheil mit sich, dafs selbst ein Schall von sehr geringer Schwingungsamplitude noch leicht eine Schallempfindung hervorruft (was ja hinlänglich bekannt), da infolge der geringen Breite der Membran auch bei minimalen Schwingungen des Steigbügels ein nicht unbedeutender Längenabschnitt der Basilmembran in Bewegung gerathen mufs.

Eine Konsequenz der entwickelten Anschauungen ist, dafs bei der Verstärkung einer einfachen auf das Ohr einwirkenden Tonschwingung die zum Centralorgan fortgepflanzte physiologische Erregung nicht in gleichem, sondern in geringerem Maafse zunimmt, als die Schwingungsamplitude.

Die vorstehenden Auseinandersetzungen über zusammengesetzte Klänge beschränken sich auf solche Klänge, die von nur zwei physikalischen Komponenten gebildet werden. Wenn

nicht nur zwei, sondern eine gröfsere Zahl Sinusschwingungen erzeugt werden, so gelten natürlich dieselben theoretischen Regeln. Bedenken erregende Schwierigkeiten scheinen mir aus diesen complicirteren Fällen für die Theorie nicht zu entstehen.

Bei vielstimmigen Accorden, wie sie in unserer Orchestermusik ganz gewöhnlich sind, ist zu erwarten, dafs der im Concertsaal stattfindenden Reflexionen wegen nicht alle Töne gleich stark auf beide Ohren, sondern die einen stärker auf das eine, die andern stärker auf das andere Ohr einwirken. Dies würde nach der Theorie in vielen Fällen zur Folge haben, dass gewisse Töne auf dem einen, gewisse auf dem anderen Ohre unhörbar werden. Da wir aber mit beiden Ohren hören, so kann nur selten ein Ton für unsere Empfindung gänzlich verloren gehen, da es nicht wahrscheinlich ist, dass häufig derselbe Ton für beide Ohren verschwindet.

Für den Genuss vielstimmiger Musik dürfte daher die Existenz von zwei Gehörorganen nicht ohne Bedeutung sein. Man kann sich leicht durch Beobachtung davon überzeugen, wenn man beim Hören von Musik das eine Ohr mit dem Finger verschließt. Die Accorde werden dann nicht nur schwächer, sondern verlieren auch im Allgemeinen erheblich an Klangfülle, was kaum anders erklärt werden kann als dadurch, dass einzelne Töne bei einohrigem Hören stark geschwächt oder ganz unhörbar sind.

Durch den Umstand, dafs die Schnecke so klein ist gegen die Wellenlänge der akustischen Reize, steht unser Gehörorgan in mancher Hinsicht zurück hinter dem Auge, da die Wellenlänge der optischen Reize verschwindend klein ist gegen die Dimensionen der Netzhaut. Dieser Nachtheil wird nur dadurch einigermafsen ausgeglichen, dafs die Entfernung unserer beiden Gehörorgane von einander einen ziemlich grofsen Bruchtheil der Wellenlänge der häufiger vorkommenden akustischen Reize darstellt.