

Ueber die Intensität der Einzeltöne zusammengesetzter Klänge.

(Fortsetzung der Abhandlung: „Zur Theorie der Differenztöne
und der Gehörsempfindungen überhaupt“.)

Von

MAX MEYER.

(Mit 2 Fig.)

Die Intensität zweier (oder mehrerer) Töne¹ steht in einem anderen Verhältniß, wenn die Töne gleichzeitig, als wenn sie gesondert erklingen. Auf diese Thatsache ist schon wiederholt (so namentlich von ALFRED MAYER²) hingewiesen worden. Die Verschiedenheit des Intensitätsverhältnisses ist freilich nicht unter allen Umständen gleich auffällig, in der musikalischen Praxis vor Allem nur in geringem Grade, so daß die geringe Beachtung, die diese Erscheinung bisher gefunden hat, nicht wunderbar ist.

Daß man die fragliche Erscheinung bis dahin nicht hat theoretisch verwerthen können, erklärt sich leicht. Der herrschenden Theorie des Hörens, die einen Resonanzapparat im Ohre wirksam sein läßt, bietet sie eben gar keinen Anknüpfungspunkt. Um die Intensitätsverschiedenheiten zu erklären, bleibt für einen Vertheidiger der Resonanzhypothese nur der eine, gänzlich unfruchtbare Weg übrig, neue Hypothesen zu machen über den Ablauf der noch vollkommen unbekannten Nervenprocesse.

¹ Hier und im Folgenden wird unter „Ton“ immer eine Tonempfindung verstanden. Wenn von physikalischen Tönen, Tonschwingungen, die Rede ist, wird dies ausdrücklich angegeben.

² *Researches in Acoustics*, No. 8. *American Journal of Science and Arts*, XII, 1876.

Eins der auffälligsten Beispiele für das Verhalten der Tonintensität darf man in dem Umstande erblicken, daß die Intensität der Obertöne bei Stimmgabeln auf Resonanzkästen in vielen Fällen gleich Null ist, obwohl sie physikalisch durchaus nicht so schwach sind, daß sie für sich allein nicht hörbar wären. Aus der von mir aufgestellten Theorie ergibt sich nun ohne Weiteres, daß die Obertöne garnicht hörbar sein können, so lange der Grundton, wie es bei Stimmgabeln der Fall ist, für sich allein bedeutend stärker ist als die Obertöne. Man construire nur einmal eine Sinusschwingung, füge hinzu die schwächere Octave, die noch schwächere Duodecime u. s. w. (Solche Figuren sind enthalten in R. KÖNIG's „Expériences d'acoustique“.) So lange die Amplitude der Theilschwingungen einen gewissen Bruchtheil der Amplitude der Grundschiwingung nicht überschreitet, ist die Folge der Superposition nur die, daß an die Stelle der ursprünglichen Sinuscurve eine andere Curve tritt, die ebenfalls die Eigenthümlichkeit besitzt, nur ein einziges Maximum und ein einziges Minimum aufzuzeigen. Dann aber kann der neuen Theorie zufolge auch nur ein einziger Ton (der Grundton) zur Empfindung gelangen. Denn nach der Theorie hängt es nicht wesentlich von der Form der auf das Ohr einwirkenden Schwingung, sondern von der Zahl der Maxima und Minima (und deren Ordinatenwerthen) ab, welche Töne gehört werden.

Hier entsteht nun die doppelte Aufgabe, theoretisch sowie durch Beobachtung die Grenzen zu bestimmen, innerhalb deren die Intensität von höheren Tönen bleiben muß, wenn diese durch einen tieferen Ton ausgelöscht werden sollen.

Die theoretische Aufgabe ist (allerdings mit gewissem Vorbehalt, wie noch bemerkt werden wird) verhältnißmäßig leicht zu lösen, wenn wir auf eine allgemeine Lösung verzichten und uns auf specielle Fälle beschränken, auf solche Phasenunterschiede nämlich, die besonders charakterisirte Curven liefern. Wir erhalten auf diese Weise für das gesuchte Amplitudenverhältniß zwei Werthe, welche die äußersten Grenzen darzustellen scheinen, zwischen denen jenes Verhältniß sich bewegt.

Die beiden Funktionen, durch welche die Curven bestimmt werden, seien $\varphi(x)$ (für den tieferen) und $\psi(x)$ (für den höheren Ton). Soll das Steigen oder Fallen der zusammengesetzten Curve nur von $\varphi(x)$ abhängen, so muß offenbar an allen Stellen,

wo $\varphi(x)$ und $\psi(x)$ sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, die Bedingung erfüllt sein, daß dem absoluten Betrage nach die Ableitung von $\psi(x)$ kleiner oder höchstens gleich der Ableitung von $\varphi(x)$ ist, also

$$\left| \psi'(x) \right| \leq \left| \varphi'(x) \right|, \quad x_1 < x < x_2.$$

Dies wenden wir nun auf eine Reihe von Intervallen an.

Intervall 1:2.

$$\text{I. } \varphi(x) = \alpha \sin x, \quad \psi(x) = -\beta \sin 2x.$$

Die gesuchte Bedingung ist

$$2\beta \cos 2x \leq \alpha \cos x, \quad 0 < x < \frac{\pi}{4}.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{\cos x}{2 \cos 2x}$$

Der kleinste Werth, den der Bruch auf der rechten Seite innerhalb des angegebenen Bezirks von x erreichen kann, ist $\frac{1}{2}$ für $x = 0$. Also ist die gesuchte Bedingung

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{2}.$$

$$\text{II. } \varphi(x) = \alpha \cos x, \quad \psi(x) = -\beta \cos 2x.$$

$$0 < x < \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{\sin x}{2 \sin 2x} = \frac{1}{4 \cos x}$$

Der kleinste Werth, den dieser Bruch erreichen kann, ist $\frac{1}{4}$.

Wir sind also zu dem Ergebniss gelangt, daß die Octave bei dem günstigsten Phasenverhältniss die Hälfte, bei dem ungünstigsten ein Viertel der Amplitude des Grundtons nicht überschreiten darf, um für das Ohr zu verschwinden.

Intervall 1:3.

$$\text{I. } \varphi(x) = \alpha \sin x, \quad \psi(x) = -\beta \sin 3x.$$

$$0 < x < \frac{\pi}{6}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{\cos x}{3 \cos 3x}, \quad \text{also } \frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{3}.$$

$$\text{II. } \varphi(x) = \alpha \sin x, \quad \psi(x) = +\beta \sin 3x$$

$$\frac{\pi}{6} < x < \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{\cos x}{3 \cos 3x}, \quad \text{also } \frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{9}.$$

Intervall 1 : 4.

$$\text{I. } \varphi(x) = \alpha \sin x, \quad \psi(x) = -\beta \sin 4x$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{\cos x}{4 \cos 4x}, \quad 1) \quad 0 < x < \frac{\pi}{8}, \quad 2) \quad \frac{5\pi}{8} < x < \frac{7\pi}{8}.$$

$$1) \quad \frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{4}, \quad 2) \quad \frac{\beta}{\alpha} < \text{ungefähr } \frac{1}{5,9}$$

Den Werth für 2) habe ich, der hier entstehenden Schwierigkeiten wegen, nur angenähert berechnet.

Wenn man die zugehörige Figur zeichnet und nach Vorschrift der Theorie zerlegt und deutet, so überzeugt man sich, daß bei dem hier angenommenen Phasenverhältniß der Bruch $\frac{\beta}{\alpha}$ den Werth $\frac{1}{5,9}$ nicht überschreiten darf, wenn der höhere Ton verschwinden soll. Daß an der Stelle 1), wo die Bedingung $\frac{1}{4}$ ist, der betreffende Reiz auch bei geringer Ueberschreitung des Amplitudenverhältnisses $\frac{1}{5,9}$ noch verschwindet, darf nicht als Hinderniß für die Entstehung des Tones 4 angesehen werden, da immerhin noch drei Reize von der erforderlichen Frequenz in der Periode übrig bleiben.

$$\text{II. } \varphi(x) = \alpha \cos x, \quad \psi(x) = -\beta \cos 4x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{\sin x}{4 \sin 4x}, \quad 1) \quad 0 < x < \frac{\pi}{4}, \quad 2) \quad \frac{\pi}{2} < x < \frac{3\pi}{4}$$

$$1) \quad \frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{16} \quad 2) \quad \frac{\beta}{\alpha} < \text{ungefähr } \frac{1}{4,4}$$

Zeichnet man die hierzu gehörige Figur, so sieht man, daß bei diesem Phasenverhältniß zwei Möglichkeiten vorliegen, zwischen denen vorläufig keine Wahl getroffen werden kann: Wenn zwei Reize an Stelle von vieren noch den Ton 4 erzeugen können, so gilt die Bedingung $\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{16}$. Vermögen zwei Reize bei Ausfall der beiden anderen den Ton 4 nicht zu er-

zeugen, so braucht der Bruch $\frac{\beta}{\alpha}$ nur den Werth $\frac{1}{4,4}$ nicht zu überschreiten, wenn der höhere Ton verschwinden soll.

Intervall 1 : 5.

$$\text{I. } \varphi(x) = \alpha \sin x, \psi(x) = -\beta \sin 5x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{\cos x}{5 \cos 5x}, \quad 1) \ 0 < x < \frac{\pi}{10}, \quad 2) \ \frac{3\pi}{10} < x < \frac{\pi}{2}.$$

$$1) \ \frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{5}, \quad 2) \ \frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{25}.$$

Wenn drei Reize bei Ausfall von zweien zur Hervorbringung des Tones 5 genügen, so gilt die Bedingung $\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{25}$; genügen sie nicht, so gilt $\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{1}{5}$.

$$\text{II. } \varphi(x) = \alpha \sin x, \psi(x) = +\beta \sin 5x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{\cos x}{5 \cos 5x}, \quad \frac{\pi}{10} < x < \frac{3\pi}{10}.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} < \text{ungefähr } \frac{1}{6,3}.$$

Intervall 2 : 3.

$$\text{I. } \varphi(x) = \alpha \sin 2x, \psi(x) = -\beta \sin 3x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{2 \cos 2x}{3 \cos 3x}, \quad 0 < x < \frac{\pi}{6}.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} < \frac{2}{3}.$$

$$\text{II. } \varphi(x) = \alpha \cos 2x, \psi(x) = -\beta \cos 3x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{2 \sin 2x}{3 \sin 3x}, \quad 0 < x < \frac{\pi}{3}.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{4}{9}.$$

Intervall 4 : 5.

$$\text{I. } \varphi(x) = \alpha \sin 4x, \psi(x) = -\beta \sin 5x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{4 \cos 4x}{5 \cos 5x}, \quad 0 < x < \frac{\pi}{10}.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \leq \frac{4}{5}.$$

$$\text{II. } \varphi(x) = \alpha \cos 4x, \quad \psi(x) = -\beta \cos 5x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} < \frac{4 \sin 4x}{5 \sin 5x}, \quad 0 < x < \frac{\pi}{5}.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} < \frac{16}{25}.$$

Bei diesem Intervall ist zu berücksichtigen, daß nach den Grundsätzen der Theorie vielleicht selbst dann noch der Ton 5 zur Empfindung kommt, wenn nur 4 Reize in der Periode vorhanden sind, vorausgesetzt, daß ihre Frequenz für den Ton 5 besser paßt als für den Ton 4. In diesem Falle würden die beiden Werthe für $\frac{\beta}{\alpha}$ zu groß sein. (Fragezeichen in der Tabelle!)

Intervall 4 : 7.

$$\text{I. } \varphi(x) = \alpha \sin 4x, \quad \psi(x) = -\beta \sin 7x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} < \frac{4 \cos 4x}{7 \cos 7x}, \quad 1) \quad 0 < x < \frac{\pi}{14}, \quad 2) \quad \frac{9\pi}{14} < x < \frac{11\pi}{14}.$$

$$1) \quad \frac{\beta}{\alpha} < \frac{4}{7}, \quad 2) \quad \frac{\beta}{\alpha} < \text{ungefähr } \frac{1}{2,1}.$$

Bei diesem Phasenverhältniß muß $\frac{\beta}{\alpha}$ kleiner sein als $\frac{1}{2,1}$, wenn der höhere Ton verschwinden soll.

$$\text{II. } \varphi(x) = \alpha \cos 4x, \quad \psi(x) = -\beta \cos 7x.$$

$$\frac{\beta}{\alpha} < \frac{4 \sin 4x}{7 \sin 7x}, \quad 1) \quad 0 < x < \frac{\pi}{7}, \quad 2) \quad \frac{4\pi}{7} < x < \frac{5\pi}{7}.$$

$$1) \quad \frac{\beta}{\alpha} < \frac{16}{49}, \quad 2) \quad \frac{\beta}{\alpha} < \text{ungefähr } \frac{1}{1,8}.$$

Bei diesem Phasenverhältniß muß wahrscheinlich $\frac{\beta}{\alpha}$ kleiner sein als $\frac{1}{1,8}$, wenn der höhere Ton verschwinden soll.

Das Ergebniß der vorstehenden Untersuchungen ist nicht gerade sehr befriedigend. Nicht nur ist der Grenzwert $\frac{\beta}{\alpha}$ bei einem und demselben Intervall verschieden je nach dem Phasenverhältnisse der beiden Töne, sondern selbst für einen bestimm-

ten Phasenunterschied erhält man vielfach mehrere Werthe von $\frac{\beta}{\alpha}$, aus denen der maafsgebende nicht immer a priori ausgewählt werden kann, da die theoretischen Voraussetzungen, aus denen hier zu deduciren wäre, erst durch die Erfahrung gewonnen werden müssen.

Die folgende Tabelle enthält das Ergebnifs in übersichtlicher Darstellung. In denjenigen Fällen, wo es zweifelhaft ist, welcher von zwei Werthen in Betracht kommt, sind beide angegeben, der jedoch, dessen Geltung mir weniger wahrscheinlich ist, in kleineren Zahlen in Klammern.

Intervall	Grenzwertb von $\frac{\beta}{\alpha}$ bei einem Phasenverhältnifs, das für das Ver- schwinden des höheren Tons mehr und weniger günstig ist.	
1:2	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
1:3	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$
1:4	$\frac{1}{4,4} \left(\frac{1}{5,9}\right)$	$\frac{1}{5,9} \left(\frac{1}{16}\right)$
1:5	$\frac{1}{6,3} \left(\frac{1}{5}\right)$	$\frac{1}{25} \left(\frac{1}{6,3}\right)$
2:3	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{9}$
4:5	$\frac{4}{5} ?$	$\frac{16}{25} ?$
4:7	$\frac{1}{1,8}$	$\frac{1}{2,1}$

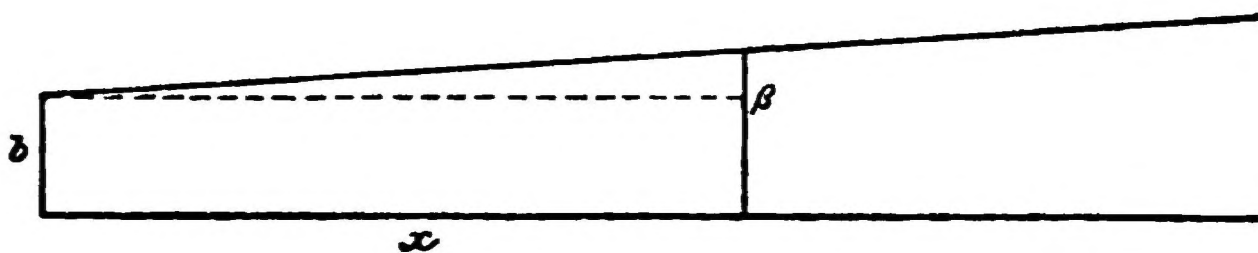
Das vorliegende Problem der Abschwächung bzw. gänzlichen Auslöschung höherer Töne durch tiefere wurde nun auch durch Beobachtungen untersucht. Ich werde über das Ergebnifs

hiervon, das mit den theoretischen Ableitungen ganz gut in Uebereinstimmung steht, gesondert berichten.

Erweiterung der Theorie des Hörens.¹

In der früheren Darstellung der Theorie war vorausgesetzt worden, daß die Nervenendigungen in gleicher Dichtigkeit der Länge nach über die Basilarmembran ausgebreitet seien, und daß 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 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 dargestellt, welche Wirkung die verschiedene Breite der Membran der neuen Theorie zufolge auf die Intensität der Töne haben muß.

Wir wollen voraussetzen, die Basilarmembran nehme vom Anfange bis zur Schnecken- spitze gleichmäßig 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 $150b$. Diese Annahmen dürften nach den bisherigen Messungen der Membran einigermaßen mit den wirklichen Verhältnissen übereinstimmen. Die Entfernung einer beliebigen Stelle der Membran vom Anfange sei x , die Breite der Membran an diesem Punkte β .



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

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

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

Die von einer Quersfaser 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 einfachste 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 aufgenommene 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.

$$\begin{aligned} 50bq &= \frac{q}{2700b^2} [(30b + x)^3 - 27000b^3] \\ x &= 24,514b \end{aligned}$$

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.¹ 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 Amplitudentheile, die sich ungefähr verhalten wie 2 : 9 : 8. Diese Theile bedeuten jedoch der wachsenden Membranbreite wegen nicht auf einander folgende Längen der Basilarmembran, 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

¹ Siehe *diese Zeitschrift* Bd. 11, S. 218, Fig. 1.

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 Stärkeverhältniß, 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 Stärkeverhältniß der gehörten Töne würde hiernach nicht ganz unabhängig sein von der absoluten Intensität, mit der die Tonschwingungen auf das Ohr einwirken. Vielmehr wird durch grössere absolute Tonintensität die relative Intensität der höheren Töne etwas begünstigt. Doch ist der Unterschied nicht so groß, daß 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, daß die Abschwächung des höheren von zwei Primärtönen im Zusammenklange nach der Theorie so außerordentlich groß ist, und daß die Differenztöne verhältnißmäfsig gar zu stark sind. Die obigen Ausführungen zeigen, daß dieses auffällige Stärkeverhältniß durch die Wirkung der verschiedenen Membranbreite derart modifizirt wird, daß kaum noch Anstofs daran zu nehmen ist, zumal wenn man bedenkt, daß die Gröfsenverhältnisse der Membran hier nur der Wahrscheinlichkeit nach angenommen sind, in Wirklichkeit aber noch andere sein können.

Falls die Basilarmembran nicht bei allen Individuen in gleicher Weise gebaut wäre, sondern bei einigen grössere, 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.

Daß die Membran gerade am Anfange so sehr schmal ist,

bringt unter Anderem den Vorthail mit sich, daß 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 Basilarmembran in Bewegung gerathen muß.

Eine Konsequenz der entwickelten Anschauungen ist, dass bei der Verstärkung einer einfachen auf das Ohr einwirkenden Tonschwingung die zum Centralorgan fortgepflanzte physiologische Erregung nicht in gleichem, sondern in geringerem Maasse 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 größere 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 Orchester-musik ganz gewöhnlich sind, ist zu erwarten, daß der erwähnten 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 Akkorde 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, daß die Schnecke so klein ist gegen die Wellenlänge der akustischen Reize, steht unser Gehörorgan in mancher Hinsicht zurück hinter dem Auge, da die Wellen-

länge der optischen Reize verschwindend klein ist gegen die Dimensionen der Netzhaut. Dieser Nachtheil wird nur dadurch einigermaßen ausgeglichen, daß die Entfernung unserer beiden Gehörorgane von einander einen ziemlich großen Bruchtheil der Wellenlänge der häufiger vorkommenden akustischen Reize darstellt.

Anhang.

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 vermittelt 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 (ent-

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

sprechend 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 oder negative) Steigung der Curve nur den bzw. die ersten Rahmen in (positive oder negative) Bewegung versetzt und damit ein Erglühen oder Erlöschen der zugehörigen Lämpchen veranlaßt. Je größer die Steigung der Curve ist, um so größer ist auch die Zahl der bewegten Rahmen und damit der zum Erglühen bzw. 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 größere 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.
