

PHYSIOLOGIE DES GEHÖRS.

VON

PROF. V. HENSEN IN KIEL.

EINLEITUNG.

In der heutigen Bearbeitung der Physiologie des Ohres findet die ältere Literatur wenig Raum; wenn man jedoch von HALLER's Elementa physiologiae IV. Lausannae 1763, Einsicht nehmen will, wo ein sehr vollständiger Literaturnachweis gegeben ist, wird man erkennen, dass grosse experimentelle und philosophische Arbeiten unserer Vorfahren nöthig und unentbehrlich waren, um den jetzigen Standpunkt unseres Wissens zu schaffen. Wie HALLER sich in manchen Stücken auf EULER's Arbeiten stützen konnte, fand JOH. MÜLLER's, (Physiologie 1840) unsere Kenntnisse sehr fördernde Bearbeitung des Gegenstandes, in den verschiedenen Versuchen von SAVART und in CHLADNI's Akustik (Leipzig 1802), namentlich aber in der Wellenlehre der Gebrüder WEBER (Leipzig 1825) einen Anhalt. Den späteren physiologischen Bearbeitungen von RINNE (Prager Vjschr. 1855), HARLESS (WAGNER's Handwörterb. d. Physiol. IV. 1853), LUDWIG (Lehrb. d. Physiol. 1858) u. A. standen namentlich die Arbeiten von SEEBECK (DOVE's Repert. VIII. Akustik) zur Seite. Während dann auf der einen Seite CORTI's (Ztschr. f. wiss. Zool. III) und MAX SCHULTZE's (MÜLLER's Archiv 1850) histologische Arbeiten die Kenntnisse des Labyrinths zeitigten, begann andererseits HELMHOLTZ im Anschluss an OHM's Klanganalyse (Ann. d. Physik. LIX. u. LXII) seine Thätigkeit auf akustischem Gebiet. Man findet dieselbe am vollkommensten dargelegt in der, jetzt in vierter Auflage erschienenen „Lehre von den Tonempfindungen“ (Braunschweig 1878). HELMHOLTZ hat die Physiologie des Ohrs so tief und zugleich so umfassend bearbeitet, dass seine Lehren dies Gebiet mit Recht beherrschen. Hinzugekommen sind zu seinen Arbeiten, um Einiges zu nennen, die experimentellen Prüfungen der Bewegungen des Paukenapparates, deren MACH sich in verschiedenen Aufsätzen besonders angenommen hat, und die Untersuchungen von PREYER über die Feinheit der Empfindungen, während A. v. OETTINGEN die physiologische Theorie der Musik weiter geführt hat.

Eine kurze Definition der Vorgänge, mit welchen sich die Physiologie des Gehörorgans zu beschäftigen hat, ist uns in NEWTON'S¹ Principien übermacht. Der Schall, heisst es dort, ist die, der Luft mitgetheilte und an das Ohr übertragene, zitternde und vibrirende Bewegung der Partikel des tönenden Körpers.

Schall ist der allgemeinste Ausdruck für diejenige Bewegung, welche unser Gehörorgan empfindet. Jede genauere Beachtung derselben lässt uns den Schall entweder als Ton oder als Geräusch oder als Gemisch beider bezeichnen.

Der Ton.

Wenn ein materieller Punkt durch äussere Kräfte aus seiner Gleichgewichtslage entfernt worden ist, so führt er, losgelassen, nach Analogie eines Pendels, Schwingungen um seine Ruhelage aus. Den Abstand des äussersten Punkts seiner Bahn von dem Ort der Ruhelage, nennt man die Amplitude seiner Schwingung, die doppelte Amplitude, seine Elongation. Die Zeit, welche der Punkt braucht, um von einer Stelle seiner Bahn aus wieder auf dieselbe Stelle mit derselben Bewegungsrichtung, mit welcher er den Lauf begann, zurückzukehren, bezeichnet man als Schwingungsdauer einer Schwingung (französisch *vibration double* v. d.). Eine halbe Schwingung (*vibration simple*) vollführt der Punkt in der halben Schwingungsdauer. Während der Zeit einer Schwingung wird er jeden Theil seiner Bahn zweimal durchlaufen, jeden Endpunkt einmal berühren müssen, wenn, was hier nur interessirt, seine Bahn auf einer geraden Linie liegt. Der Bewegungszustand des Punktes wird als Schwingungsphase bezeichnet. Dieser Ausdruck umfasst 1) die Angabe des Orts auf der Bahn, 2) die Richtung, in welcher sich der Punkt in dem gedachten Augenblick bewegt. Der Ort der Gleichgewichtslage wird als 0-Punkt angesehen; es ist gleichgültig, welchen Theil der Bahn man als positiv betrachtet, bei graphischen Darstellungen pflegt man den oberen, eventuell den nach rechts gehenden Theil der Bahn positiv zu nehmen.

Die um eine halbe Schwingungsdauer von einander entfernten Phasen nennt man entgegengesetzte. Der in diesen beiden Phasen sich befindende Punkt bewegt sich mit gleicher Geschwindigkeit aber in entgegengesetzter Richtung, und die betreffen-

¹ NEWTON, *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Genevae 1740. Tom. II. p. 348.

bis zum nächsten Molekel um die Wegestrecke ξ fortpflanze dann besteht die Gleichung

$$c\tau = \xi.$$

da τ sehr klein, wird eine ganze Zahl m so gewählt werden können, dass

$$m\tau = T$$

die Schwingungsdauer eines zu untersuchenden Tons ist. Dann ist

$$cm\tau = m\xi = cT,$$

d. h. während einer Schwingungsdauer T durchläuft die Bewegung die Strecke $m\xi$, es werden alle auf dieser Strecke liegenden Molekel den Anstoss successive erhalten haben, welcher zur Zeit $t=0$ am Anfang der Strecke $m\xi$ eintraf. Hatte das am Anfang liegende Molekel gerade eine Schwingung vollendet, so wird das am Ende von $m\xi$ liegende im Begriff sein mit einer Schwingung zu beginnen. Alle dazwischen liegenden Molekel werden successive in allen Schwingungsphasen, die bei Pendelschwingungen vorkommen, begriffen sein, jedes wird aber eine andere Phase haben. Diese, durch eine grosse Reihe von Molekeln repräsentirte volle Schwingung wird als Welle bezeichnet. Ihre Länge λ ist durch die Formel

$$\lambda = cT \dots \dots \dots (3)$$

bestimmt.

Da in einem Wellenzuge jedes folgende Molekel um soviel später zu schwingen beginnt, wie die Wegstrecke, welche der Stoss von Molekel zu Molekel zu durchlaufen hat, an Zeit erfordert, so wird seine Phase getroffen, wenn von dem Ausdruck $\frac{t}{T}$ die betreffende Zeit oder, was dasselbe ist, die zwischen dem ersten und den folgenden Molekeln befindliche Wegstrecke abgezogen wird. Da jede Welle die Wiederholung der früheren ist, genügt es für die Bestimmung eines Wellenzuges den variablen Bruchtheil einer Wellenlänge d. i. den Ausdruck $\frac{x}{\lambda}$ als Minuendus für $\frac{t}{T}$ einzusetzen, also zu schreiben:

$$y = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \dots \dots \dots (4)$$

$$v = a \frac{2\pi}{T} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \dots \dots \dots (5)$$

Diese Formeln behalten Gültigkeit für jeden numerischen Werth von x . Für das, die Bewegung beginnende Molekel ist $x=0$, die Formeln nehmen die Gestalt von 1 u. 2 an. Für alle vorhergehenden hat x den Abständen entsprechende Werthe, doch ist zu beachten, dass $\sin(a \pm 2n\pi)$ oder $\cos(a \pm 2n\pi) = \sin. a$ u. $\cos. a$, wenn n eine ganze Zahl. Die Werthe von x welche zwischen 0 u. λ liegen, geben also schon alle vorkommenden Werthe. Wird für x eine Constante gesetzt, so wird dadurch der Anfang der Bewegung gegenüber

der Formel 1 um eine entsprechende Phase verschoben. Graphisch lässt sich die Formel 4 nicht darstellen, weil sie die Welle in ihrem steten Wechsel giebt, doch kann man die Phasen z. B.

$$\frac{t}{T} = \frac{1}{12}, \quad \frac{x}{\lambda} = 0, \frac{1}{12}, \frac{2}{12} \dots\dots 1$$

fixiren wie dies in Fig. 1 geschehen ist.

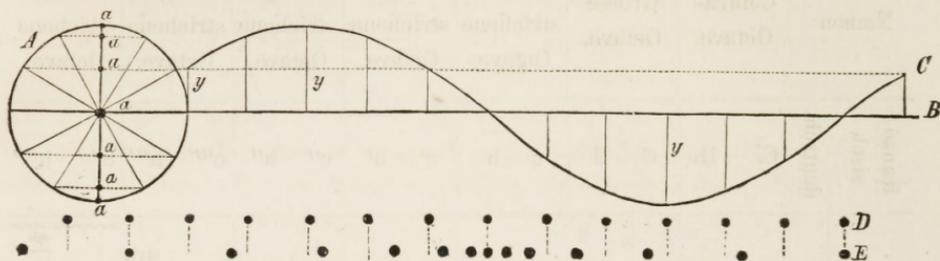


Fig. 1.

A. Eine Anzahl von Lagen des schwingenden Punktes α sind mit Hülfe einer Zwölftheilung des Kreisbogens für 12 Phasen nach Formel 1 gezeichnet, dabei ist $a = 6$ mm. genommen. Der Punkt wird die Transversalwelle C verzeichnen, wenn an ihm eine Fläche in der Richtung der Abscisse B in gleichmässiger Geschwindigkeit vorbeigezogen wird, die Ordinaten y stehen auf $\frac{1}{12}$ der Wellenlänge. Eine Reihe wie bei D angeordneter Molekel würde nach demselben Gesetz bei dem Durchgang einer Welle der angegebenen Amplitude eine zu Verdichtung und Verdünnung führende Verschiebung erleiden, wie solches durch die Reihe E dargestellt ist.

Die Töne machen je nach der absoluten Geschwindigkeit ihrer Oscillationen einen verschiedenen Eindruck auf unser Ohr; die langsamer schwingenden sind tiefer wie die rascher schwingenden. Man unterscheidet unter allen möglichen Tönen gewisse durch bestimmte Abstände — Tonstufen — von einander getrennte Töne. Eine Hauptstufe ist die Octave, weil die sie abgrenzenden beiden Töne sich jedem Ohr als höchst verwandte darstellen. Sie umfasst alle Schwingungen, welche zwischen einfacher und doppelter Oscillationsgeschwindigkeit liegen. Innerhalb jeder Octave werden durch die Tonleiter noch 7 ungleich breite Stufen unterschieden, nämlich:

$$C : D : E : F : G : A : H : C$$

$$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8} : 2$$

$$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\frac{9}{8}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\frac{10}{9}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\frac{16}{15}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\frac{9}{8}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\frac{10}{9}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\frac{9}{8}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\frac{16}{15}}$$

Die obere Reihe giebt den Bruch an, mit welchem der Grundton zu multipliciren ist, um die Schwingungszahl des betreffenden Tons

zu erhalten, die untere Reihe giebt die Grösse des Intervalls der einzelnen Tonstufen.

Die absoluten Schwingungszahlen (v. d.) nehmen die Physiker wie folgt an:

Gebrauchliche Töne (Tab. I).

Namen		Contra- Octave.	Grosse Octave.	Unge- strichene Octave.	Einge- strichene Octave.	Zweige- strichene Octave.	Dreige- strichene Octave.	Vierge- strichene Octave.
franzö- sisch	deutsch	C ₁ — H ₁	C — H	c — h	c' — h'	c'' — h''	c''' — h'''	c'''' — h''''
Ut.	C.	33	66	132	264	528	1056	2112
Re.	D.	37,125	74,25	148,5	297	594	1188	2376
Mi.	E.	41,25	82,5	165	330	660	1320	2640
Fa.	F.	44	88	176	352	704	1408	2816
Sol.	G.	49,5	99	198	396	792	1584	3168
La.	A.	55	110	220	440	880	1760	3520
Si.	H.	61,875	123,75	247,5	495	990	1980	3960

Zusammensetzung von Schwingungen.

Die bisher besprochene Bewegung, deren Form eine Sinuscurve darstellt, kommt in der Natur fast nicht vor; in der Regel greifen gleichzeitig mehrere Kräfte den schwingenden Punkt an, wodurch die Form der Bewegung complicirter wird. Sind die entstehenden Bewegungen einander parallel, so summiren sie sich einfach. Wenn also zur Zeit t ein Punkt in Folge der einzelnen Stösse die Ordinaten $y - y' + y'' - \dots - y_n$ haben würde, so wäre bei gleichzeitiger Wirkung aller die resultirende Ordinate Y

$$Y = y - y' + y'' - \dots - Y_n.$$

Durch solche Summirung kann die Bewegung höchst verwickelt werden.

Theiltöne.

Wenn sich der langsamsten Schwingung sogleich eine Reihe von Tönen der genau doppelten, dreifachen, überhaupt vielfachen

Schwingungsgeschwindigkeit hinzugesellt, so gestaltet sich der Ausdruck des Vorgangs für den einzelnen Punkt nach folgender Form:

$$y = a \sin 2 \pi \frac{t}{T} + b \sin 4 \pi \frac{t}{T} + c \sin 6 \pi \frac{t}{T} + \dots + p \sin 2 n \pi \frac{t}{T} \quad (6)$$

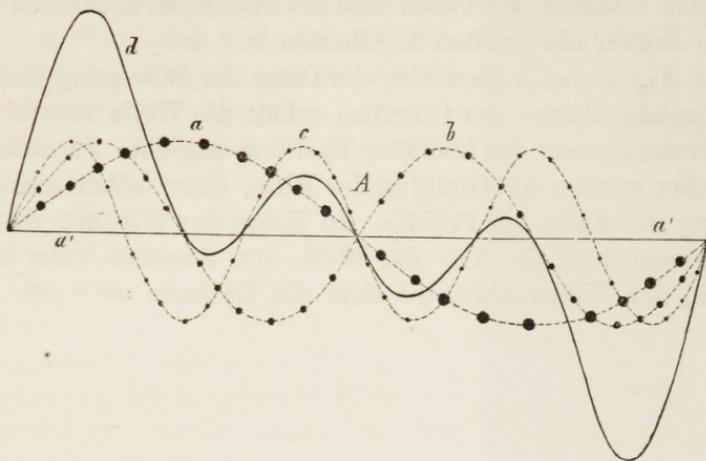


Fig. 2.*

Die Bewegung ist also die Resultante so vieler einfacher Schwingungen, wie Glieder auf der rechten Seite befindlich sind und die Ge-

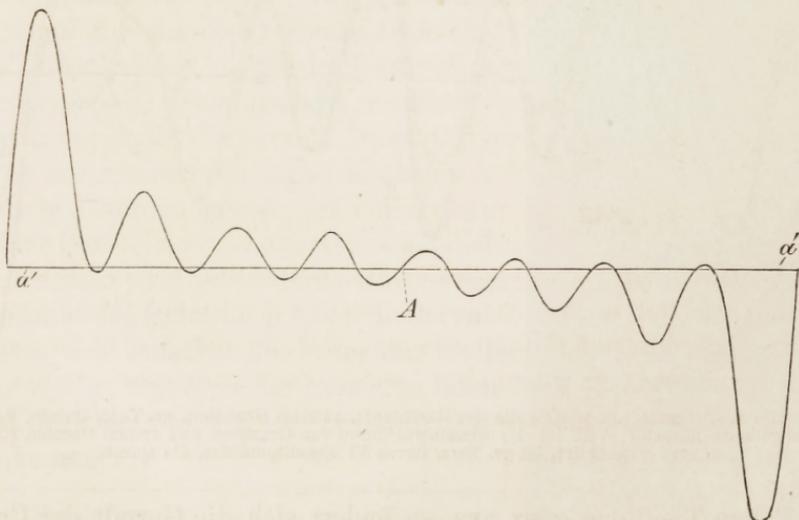


Fig. 3.*

sammtheit dieser Glieder nach ihrer Periode und Amplitude bestimmt die Form der Bewegung. Jedes einzelne Glied bezeichnet man als

* Fig. 2 a' a' Abscissenaxe, a 1., b 2., c 3. Theiltone von 11 mm. Amplitude zu der Toncurve d vereint, halbe Wellenlänge bei A . Fig. 3 giebt die Curve der 8 ersten Theiltöne alle mit einer Amplitude von 5 mm.

Theil- oder Partialton und benennt es als 1., 2., 3., 4. Glied, je nach der Ordnungszahl, die ihm in der geschlossenen Theiltonreihe zukommt. Ist z. B. $C_1 C$ (Tab. I) der erste Theilton, so sind $C-G$, c , e , g die 5 folgenden, c' , d' , e' der 8. bis 10., h' c' der 15. und 16. Theilton. Den zweiten Theilton bezeichnet man als ersten harmonischen Oberton, den dritten als zweiten h. Oberton u. s. w.

Nach Fig. 2 und 3 lässt sich der Gang der Bewegung übersehen. Bei genügender Stärke der Obertöne erhält die Welle so viel Gipfel, wie die Ordnungszahl des höchsten Theiltons angiebt. Je mehr Töne, desto flacher werden die Gipfel in der Mitte, desto höher und stärker am Anfang und Ende der Periode. In Folge der Wirkung des ersten Theiltons schneidet die Axe der Welle die Abscisse unter spitzem Winkel in der Wellenmitte, wo stets die Ordinate = 0 ist.

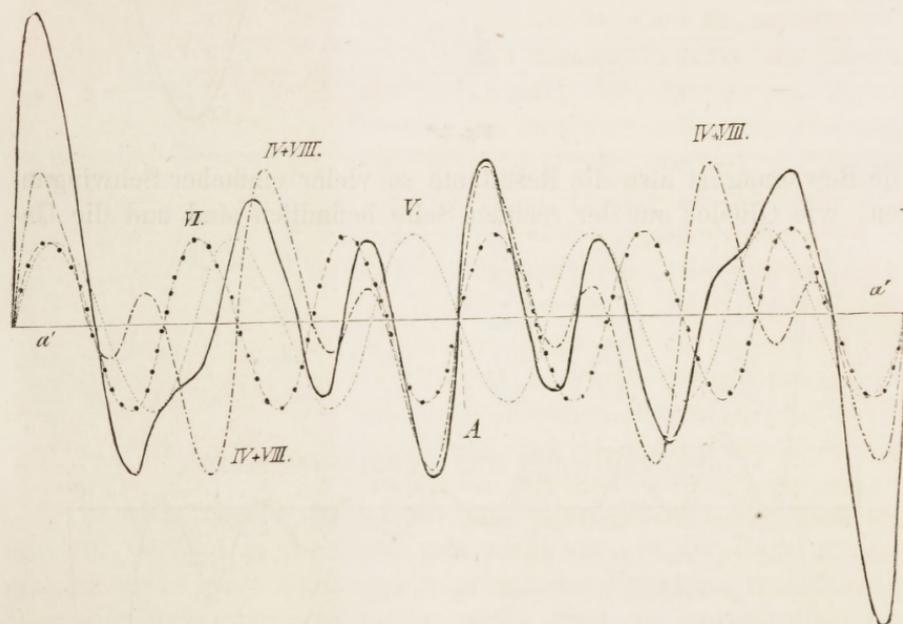


Fig. 4. Die ausgezogene Linie ist Welle des Duraccords, nämlich Grundton, gr. Terz, Quinte, Octave. Die gestrichelte Linie IV, VIII ist die combinirte Curve von Grundton und erstem Oberton (Octav) Curve V punkirt, ist gr. Terz, Curve VI doppelpunktirt, die Quint.

Fallen Theiltöne ganz aus, so ändert sich die Gestalt der Curve erheblich. So entsteht z. B. die Figur 4 aus der Gleichung

$$y = \sin 8 \pi \frac{t}{T} + \sin 10 \pi \frac{t}{T} + \sin 12 \pi \frac{t}{T} + \sin 16 \pi \frac{t}{T}$$

in welcher die Amplitude zu 11 mm genommen ist.

Es ist dies also eine Theiltoncurve, in welcher 1., 2., 3. und

7. Ton fehlen. Trotzdem ist die Wellenlänge diejenige des Grundtons, $\sin 2\pi \frac{t}{T}$, aber die Wellenaxe geht jetzt in der Abscisse. Es können acht Gipfel unterschieden werden, doch sind zwei in Folge Ausfallens des 7. Theiltons nur als Wendepunkte angedeutet.

Wenn die Amplituden sich verändern, tritt eine so erhebliche Umgestaltung der Bewegung ein, dass das Auge die Aehnlichkeiten schwer erkennt. Es wird genügen, dies an zwei Beispielen zu demonstrieren.

Auf nebenstehenden Curven hat eine Stimmgabel auf der berussten Fläche einer zweiten, welche in *A* die Octave, in *B* die Quinte angab, die Schwingungen geschrieben, mit ihrer Spitze darauf hingleitend. Der Grundton und der höhere Ton haben bei 1 u. 3 ihre Schwingungen *für sich* gezeichnet, die Amplitude des ersteren nimmt von oben nach unten gehend ab, die des letzteren zu. Die aus beiden Schwingungen resultirende Bewegung ergibt die Curve 2. Da die Curve 3 von der zweiten Stimmgabelbranche geschrieben werden musste, ist ein geringer Fehler ihrer relativen Lage wahrscheinlich. Die Curve *B* wird schon durch sehr geringe Intensität der Quint beeinflusst. In Curve *A* ändert sich zunächst die Form der Welle sehr wenig; erst bei einer grösseren Intensität des Obertons tritt der zweite Wendepunkt auf.*

* Durch Construction kann man solche Curven kaum darstellen, die Rechnung giebt Folgendes:

$$\text{Für } y = a \sin 2\pi \frac{t}{T} + b \sin 4\pi \frac{t}{T}$$

ist die Krümmung $\frac{=y''}{(1+y'^2)^{3/2}}$.

Der Zeichenwechsel, welcher den Wendepunkt anzeigt, kann nur vom Zähler abhängen, wird also für $y'' = 0$ erfolgen. Es ist

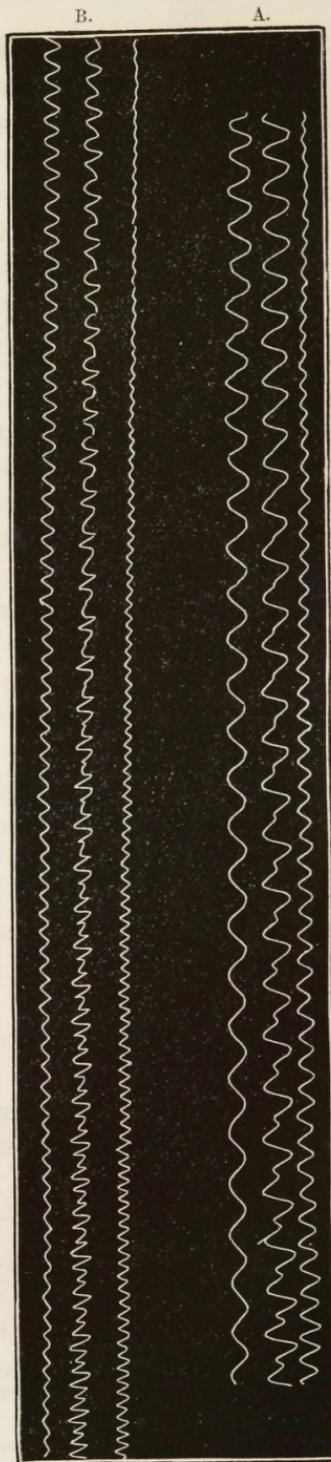


Fig. 5.

Jede Combination von Tönen lässt sich nach Analogie des Accordes als Summirung einiger zu einem gemeinsamen Grundton gehörenden Theiltöne auffassen, sobald man kleinste Bruchtheile der Schwingungen ausser Acht lässt, doch kann dabei die Wellenlänge des Grundtons eine sehr grosse werden. Der Grundton der Combination 1000 und 1001 ist 1, mit der Wellenlänge von 1000 Wellen des Tons 1000.

Phasenverschiebung.

Bisher ist angenommen, dass die combinirten Schwingungen gleichzeitig beginnen. Wenn zwei, in verschiedener Entfernung stehende Tonquellen gleichzeitig in Wirksamkeit treten, oder wenn die Töne Resonanzräume durchlaufen, ehe sie an das Trommelfell gelangen, findet solche Gleichzeitigkeit nicht mehr statt. Der Anfangstheil der einen Welle wird dann im Allgemeinen gegen denjenigen der anderen verschoben sein und die resultirende Bewegung kann sehr bedeutende Veränderungen, gegenüber den bisher besprochenen Formen erleiden. Die einzelnen Fälle müssen gesondert werden.

Gleich hohe Töne, welche unter Verschiebung ihrer Phase zur Wirkung kommen, ergeben eine Welle, deren Amplitude, je nachdem, zwischen der Summe oder Differenz der Amplituden beider sich hält, also bei gleichen Amplituden zur 0 herabsinken kann.

Die Gleichung der Bewegung würde sein

$$y = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \varphi \right) + a' \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \varphi' \right)$$

Die Bedeutung der Buchstaben ist die frühere. φ und φ' sind echte Brüche und die Differenz $(\varphi - \varphi')\pi$ ist der Werth, um welchen der eine Ton dem anderen in der Phase voraus ist. $\varphi = \varphi'$ giebt vollständige Addirung der Ordinaten der Welle, $\varphi - \varphi' = \frac{1}{2}$ zeigt an, dass der eine Ton gegen den anderen um eine halbe Wellenlänge verschoben ist, Wellenberg steht gegen Wellenthal, die Ordinaten subtrahiren sich durchgehend. Für jede Phasenverschiebung gilt übrigens die Gleichung

$$\begin{aligned} y' &= a \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi t}{T} + b \frac{4\pi}{T} \cos \frac{4\pi t}{T} \\ y'' &= -a \frac{4\pi^2}{T^2} \sin \frac{2\pi t}{T} - b \frac{16\pi^2}{T^2} \sin \frac{4\pi t}{T} \text{ oder} \\ y'' &= -\frac{4\pi^2}{T^2} \sin \frac{2\pi t}{T} \left(a + 8b \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \\ y'' \text{ wird } 0 &\text{ für } x = \frac{T}{2} \text{ und für } a = 8b \text{ wenn } \frac{2\pi t}{T} = \pi \end{aligned}$$

so lange also $a >$ als $8b$ kann der zweite Wendepunkt nicht eintreten.

$$A \sin 2 \pi \left(\frac{t}{T} + \Phi \right) = a \sin 2 \pi \left(\frac{t}{T} + q \right) + a' \sin 2 \pi \left(\frac{t}{T} + q' \right) \quad (7)$$

wo sich der Ausdruck links durch die Gleichungen

$$A \sin 2 \pi \Phi = a \sin 2 \pi q + a' \sin 2 \pi q'$$

$$A \cos 2 \pi \Phi = a \cos 2 \pi q + a' \cos 2 \pi q'$$

bestimmt.*

Töne verschiedener Höhe geben nicht mehr eine so vollkommene Interferenz.

Bei Intervallen bis zur Quint kann noch die Amplitude des tieferen Tons unter die ihm zukommende Amplitude herabgedrückt werden, aber im Verlauf der Welle des Theiltons 1 muss sowohl eine Addition wie Subtraction stattfinden. Bei grösseren Intervallen ist die Welle des höheren Tons bereits relativ so kurz, dass eine Subtraction und Addition schon im Verlauf einer Welle des Grundtons stattfindet. Die resultirende Welle kann also nicht mehr eine geringere Amplitude als diejenige des Grundtons annehmen. Man macht sich dies leicht mit Hülfe einfacher Construction der drei Wellen klar.

Bei den Phasenverschiebungen ungleich hoher Töne ändert sich die Form der Welle bedeutend. Die positive und die negative Welle, welche ohne Phasenverschiebung die eine das Spiegelbild der anderen ist, hören auf symmetrisch zu sein. Die 0-Punkte verschieben sich, die Wellen-Berge und -Thäler verlagern sich und werden un-

* Die Gleichung 7 nach der Sinusregel aufgelöst giebt:

$$A \left(\sin \frac{2 \pi t}{T} \cos 2 \pi \Phi + \cos \frac{2 \pi t}{T} \sin 2 \pi \Phi \right) = a \left(\sin \frac{2 \pi t}{T} \cos 2 \pi q + \cos \frac{2 \pi t}{T} \sin 2 \pi q \right) + a' \left(\sin \frac{2 \pi t}{T} \cos 2 \pi q' + \cos \frac{2 \pi t}{T} \sin 2 \pi q' \right) \text{ oder}$$

$$0 = (a \cos 2 \pi q + a' \cos 2 \pi q' - A \cos 2 \pi \Phi) \sin \frac{2 \pi t}{T}$$

$$+ (a \sin 2 \pi q + a' \sin 2 \pi q' - A \sin 2 \pi \Phi) \cos \frac{2 \pi t}{T}$$

setzen wir hier $t = 0$, so wird

$$\sin \frac{2 \pi t}{T} = 0, \cos \frac{2 \pi t}{T} = 1 \text{ also}$$

$$A \sin 2 \pi \Phi = a \sin 2 \pi q + a' \sin 2 \pi q'$$

setzen wir

$$t = \frac{T}{4}$$

so wird

$$\cos \frac{2 \pi t}{T} = 0, \sin \frac{2 \pi t}{T} = 1 \text{ also}$$

$$A \cos 2 \pi \Phi = a \cos 2 \pi q + a' \cos 2 \pi q'$$

woraus zugleich die Richtigkeit der Gleichung 7 ersichtlich ist.

symmetrisch. Für das Auge wird diese Aenderung allerdings nur bei Combinationen innerhalb der Doppeloctav recht auffallend und auch hier können sehr viele verschiedene Wellenformen nicht erzeugt werden, weil kleine Phasenverschiebungen keinen recht sichtbaren Einfluss haben. Sobald jedoch mehr als zwei Töne combinirt werden, wird es auch dem besten Kenner derartiger Curven nicht möglich, sie ohne Messen und Rechnung einigermaßen in ihre Componenten zu zerlegen.

Ein Bild solcher Phasenverschiebungen giebt die nachstehende Figur.

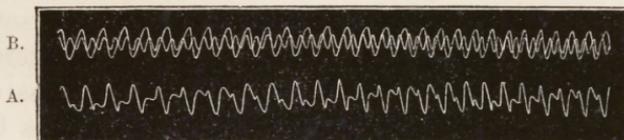


Fig. 6. *A* combinirte Welle, hervorgegangen aus dem 9. und 17. Theilton. Das Bild giebt die Phasenverschiebungen zwischen Grundton und Octav in allen Stufen, welche für das Auge erheblichere Unterschiede zeigen. Die Curve würde annähernd genau aus der Combination der beiden ineinander geschriebenen Toncurven *B* hervorgehen.

Die Combinationstöne.

Unter Umständen entstehen aus der Combination zweier Töne Wellen, welche complicirter Art als diejenigen sind, welche wir bisher betrachtet haben. Die veränderte Form macht sich dem Ohr durch das Auftreten neuer Töne, der von SORGE zuerst entdeckten Combinationstöne bemerklich. Die bisher gegebenen Formeln und Curven sind unter der Annahme abgeleitet, es sei die Verschiebung der schwingenden Punkte so klein, dass nur die erste Potenz der Verschiebung auf die Bewegungsform von merklichem Einfluss sei. Wenn die durch den Anstoss bewirkte Verschiebung gross ist, so gewinnt auch das Quadrat der Verschiebung Einfluss auf die resultirende Bewegung. Die Kraft *k*, welche einen Punkt, der in der *x* Axe oscillirt, beherrscht, hat dann nicht mehr die Form

$$k = ay$$

von welcher die Bewegung bisher abgeleitet wurde, sondern

$$k = ay + by^2$$

wo *a* und *b* Constanten sind.

Tritt in Folge des Einflusses zweier Töne (Schallwellenzüge) die wir $\sin(pt)$ und $\sin(qt)$ nennen wollen, deren Schwingungszahl also *p* u. *q* per Sec. ist, eine entsprechend starke Verschiebung des schwingungsfähigen Punktes ein, so ergiebt die Rechnung (6. Beil. XII) dass die resultirende Bewegung durch eine grössere Reihe periodischer Glieder (Cosinusglieder) ausgedrückt werden muss, jedem dieser Glie-

der entspricht ein Ton. Die Reihe der Schwingungszahlen der Glieder ist $p, q, 2p, 2q, (p-q) (p+q) 3p, 3q, (2p+q), (2p-q), (p+2q), (p-2q) 4p, 4q \dots$ Nicht jeder dieser Töne muss gehört werden, manche sind verschwindend schwach oder liegen einander zu nahe um gesondert zur Wahrnehmung zu kommen, oder es fallen auch, z. B. für Grundton und Octav viele Glieder zusammen. Die nicht eingeklammerten Werthe sind identisch mit Theiltönen; unter den eingeklammerten Werthen gehören die aus den Differenzen entstandenen Schwingungszahlen Combinationstönen an, welche als Differenz-töne bezeichnet werden, die anderen aus Summirungen hervorgehenden, bezeichnet man als Summationstöne.

Die Differenz-töne hatte HÄLLSTRÖM² in folgende Rubriken geordnet:

(Tab. II.)	Töne	Combinationstöne
	p, q	$p-q$ 1.
	$p-q, p$	2 $p-q$ 2.
	2 $p-q, q$	2 $(p-q)$ 3.
	2 $p-q, p-q$	3 $p-2q$ 4.

und man spricht dementsprechend von Differenz-tönen 1., 2. n. Ordnung. Sind neben den Grundtönen noch Theiltöne vorhanden oder durch die Combination entstanden, so werden sich auch Differenz-töne der Obertöne bilden.

Die Summationstöne sind meistens recht schwach, sie sind von HELMHOLTZ³ entdeckt und waren ihm eine wichtige Handhabe, um den Nachweis zu führen, dass unser Ohr die Glieder, aus welchen sich eine combinirte Tonbewegung zusammensetzt, einzeln zu erkennen vermöge. Wenn neuerdings von APPUNN⁴ gefunden wird, dass der erste Summationston nicht auftritt, wenn unter sonst günstigen Bedingungen die zweiten Theiltöne $2p, 2q$ im Klang fehlen und der Summationston daher für identisch mit dem Differenzton $2p - (p - q) = p + q$ gehalten wird, so zeigt sich die Schwierigkeit des objectiven Nachweises des Summationstones, aber das genügt nicht, um den mathematischen Nachweis des Vorhandenseins von Summationstönen zu erschüttern.⁵

Allerdings ist es nicht allein die Grösse der Bewegung, von

2 HÄLLSTRÖM, Ann. d. Physik. XXIV. S. 444.

3 HELMHOLTZ, üb. Combinationstöne, Ann. d. Physik XCIX. S. 497, Monatsber. d. Berliner Acad. 22. Mai 1856.

4 PREYER's Combinationstöne, Sitzgsber. d. Jenaischen Gesellsch. 1878.

5 Neuerdings ist PREYER, akustische Untersuchungen 1879, Samml. 2. Reihe. 4. Heft, ausführlich auf diesen Gegenstand zurückgekommen. Ich bedauere die Ergeb-

welcher das Entstehen der Combinationstöne abhängt. Dieselben werden am leichtesten erzeugt, wenn die beiden Tonquellen rückwärts auf einen gemeinschaftlichen Resonanzraum (Windkasten der Sirene, Blasebalg der Pfeifen) wirkend, in innigste Wechselbeziehung treten. Die Wahrnehmung wird nothwendig durch die Intensität der combinirten Töne erschwert. Um die Differenztöne kennen zu lernen, empfiehlt es sich, sehr hohe Orgelpfeifen, deren Grundton unser Ohr schon relativ schwach erregt, zu combiniren, dann treten die tieferen Differenztöne überraschend stark hervor. Hat man so die Erscheinung kennen gelernt, wird man die im Voraus zu berechnenden Töne auch in niederen Lagen der Scala leicht finden. Uebrigens hört unser Ohr nicht selten (stets! nach PREYER) Combinationstöne, welche im Luftraum nicht vorhanden, daher durch Tonverstärkungsapparate nicht nachzuweisen sind. Dann entstehen die gehörten Bewegungen erst im Trommelfell, was bei Besprechung desselben erörtert werden wird.

Geräusche.

Die Analyse der Geräusche ist bis jetzt wenig ausgebaut. Die Lehrbücher der Physik enthalten darüber fast nichts und in der Physiologie hat man sich nur mit der Art, in welcher die Geräusche der Sprache erzeugt werden, eingehender beschäftigt. Für das Gehör sind jedoch die Geräusche eine sehr wichtige Quelle der Erregung. Da man nach den Erfahrungen mit dem BELL'schen Telephon weiss, dass freischwingende, dünne, membranartige Platten im Stande sind die Geräusche zu reproduciren, kann man mit Hülfe gut gedämpfter Membranen diese Bewegungen studiren. HELMHOLTZ⁶ charakterisirt die Geräusche im Wesentlichen folgendermassen. Es zeigt sich im Allgemeinen, dass im Verlauf eines Geräusches ein schneller Wechsel verschiedenartiger Schallempfindungen eintritt. Das Rasseln des Wagens auf dem Pflaster, das Plätschern und Brausen der Wasserfälle und Meereswogen, das Rauschen der Blätter zeigt überall einen raschen und unregelmässigen aber deutlich erkennbaren Wechsel stossweise aufblitzender, verschiedenartiger Laute. Mit Hülfe

nisse seines Werks nicht mehr dem Text einfügen zu können, da derselbe bereits am 1. Jan. 1879 abgeschlossen und abgeliefert war.

PREYER findet, dass die Combinationstöne überhaupt nicht objectiv wahrnehmbar zu machen sind, da ihm der Nachweis mit den Mitteln, welche ihm am feinsten erscheinen, Resonatoren und sehr gut schwingenden Stimmgabeln, nicht gelang. Diese Töne müssen daher im Ohre (oder ähnlich gebauten Theilen) entstehen. Er bestätigt, dass der gehörte Summationston ($\alpha + \beta$) sich bisher stets als Differenzton

$$n\beta - (n-1)\beta - \alpha]$$

erkläre.

⁶ HELMHOLTZ, die Lehre von den Tonempfindungen. S. 14. Braunschweig 1870.

von Resonatoren kann man aus derartigen und anderen Geräuschen einzelne Töne deutlicher zur Wahrnehmung bringen, auch kann man Geräusche aus musikalischen Klängen zusammensetzen, z. B. wenn man sämmtliche Tasten eines Claviers innerhalb der Breite von einer oder zwei Octaven gleichzeitig anschlägt. Aus der unregelmässig wechselnden Empfindung des Ohrs bei den Geräuschen lässt sich schliessen, dass bei diesen auch die Erschütterungen der Luft eine unregelmässig sich verändernde Art der Bewegung sein müsse.

Diese Auffassung hat bisher nur Bestätigung erhalten; man muss sich also die Geräusche aufs innigste mit Tonschwingungen verbunden denken, die, längere oder kürzere Zeit aufblitzend, durch Pausen absoluter oder relativer Stille unterbrochen werden.

Man kann etwa drei Kategorien ungemischter Geräusche unterscheiden, nämlich 1) Schwebungen, 2) Knall, 3) zischende Geräusche, aber sie bilden Uebergänge untereinander und umfassen nicht alle Bewegungsformen der Geräusche, weil auch ganz kurz dauernde Tonschwingungen nur als Geräusch zur Wahrnehmung kommen.

Schwebungen.

Wenn periodische Bewegungen, welche in einem engeren Verhältniss als dem der Quint zu einander stehen, (also in einer Obertonreihe den benachbarten Theiltönen 3. und höherer Stelle angehören), gemeinsam erklingen und die Luft oder sonstige, für jede Mitschwingung geeignete Körper in Bewegung setzen, so entsteht die Erscheinung der Schwebungen. Innerhalb der Wellenlänge des zu den Theiltönen gehörenden *Grundtons* tritt nämlich eine derartige Interferenz der Bewegung ein, dass die Ordinaten im ganzen Verlauf von ein oder mehreren Wellen der betreffenden Theiltöne sich subtrahiren, also die Amplitude der aus den beiden Tönen sich zusammensetzenden Tonwelle eine geringere wird, wie diejenige der stärkeren der beiden Einzelwellen. Dafür tritt an einem anderen Ort der Welle des Grundtons, und zwar um eine halbe Wellenlänge von der Stelle der Schwächung entfernt (resp. um die Zeit einer halben Schwingung später) eine entsprechende Verstärkung der Partiarwelle auf. Diese Veränderungen in den Amplituden (resp. der Intensität) sind um so bedeutender 1) je näher die Schwingungszahlen der combinirten Töne einander stehen, 2) je mehr gleich die Amplituden beider Töne sind.

Die Art der Bewegung wird aus der folgenden Curve zu entnehmen sein.

Fig. 7. Interferenz der Theiltöne 50 und 51 mit nahe gleicher Amplitude. Die Wellenlänge des (fehlenden) Grundtons tritt sehr deutlich hervor.

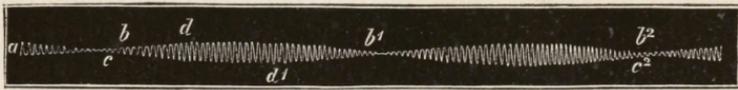


Fig. 7.

Je nach der Häufigkeit mit welcher in der Zeiteinheit der Wechsel in der Amplitude eintritt ist die Wirkung auf unser Ohr verschieden. Bei langsamem Wechsel, bis etwa 10 mal die Secunde haben wir, abgesehen von einer kleinen Schwankung der Tonhöhe, die Empfindung rythmischer Schwellungen (Schläge) des Tons. Bei rascherem Wechsel tritt, wie HELMHOLTZ (6. S. Abschnitt) im Gegensatz zu früheren Ansichten, welche Differenztöne und Schwebungen für gleich hielten, erkannt und scharf betont hat, das Geräusch des Schnarrens, Knatterns, Knarrens, Schwirrens als Begleitung der Töne auf. Bei noch grösseren Geschwindigkeiten von 40 bis 130 Schlägen bleibt nur noch eine Rauigkeit an den Tönen haften. Finden sich neben den schwebenden Tönen noch andere, so hängt es von den relativen Intensitäten ab, ob die Geräusche hervortreten. Die Erfahrung lehrt, dass auch in diesem Falle Schwebungen leicht bemerkt werden. Die einzelne Note eines Toninstrumentes kann schon Schwebungen geben, denn in einer Reihe von Theiltönen liegen diejenigen vom 8. angerechnet bereits so eng zusammen, dass bei ihnen in nicht zu grosser Tonhöhe Schwebungen sehr hörbar werden. Ausserdem fallen die unharmonischen Obertöne*, wie solche von den musikalisch weniger gebrauchten Stimmgabeln, Blechinstrumenten, Pauken u. s. w. erzeugt werden, untereinander und mit harmonischen Obertönen so nahe zusammen, dass starke Stösse resp. die oben genannten Geräusche entstehen.

In Fällen, wo die Instrumente einen starken, an Obertönen reichen, Schall geben, sowie bei verstimmtten Accorden treten die Schwebungen lebhaft hervor. Dies ist z. B. bei aufschlagenden Zungenpfeifen, welche nach HELMHOLTZ die Obertöne bis zum 16. und 20. stark hören lassen, in hohem Maasse der Fall. Dieselben haben einen sehr scharfen, schneidenden und schwirrenden Klang. Bei auf-

* Diese Töne verhalten sich bei den verschiedenen Instrumenten sehr ungleich, bei Stimmgabeln ungefähr wie die Quadrate der ungraden Zahlen, bei Glocken wie die Quadrate der Zahlenreihe. Wenn Scheiben, Schwingungen mit mehreren Durchmessern und Kreisen machen, so entstehen z. B. nach einer von HELMHOLTZ (6. S. 123) gegebenen Tabelle in der Nähe des 6. harmonischen Theiltons drei unharmonische Töne, die kaum um das Intervall eines Vierteltons voneinander entfernt liegen.

gesetztem Schallbecher wird der Ton blöckend und bölkend, so dass die genannte Geräuschempfindung, welche den Ton fast überwältigt, vielleicht auf complicirte Schwebungsformen zurückzuführen ist.

Der Knall.

Es wird von Physikern ⁷ der Knall als eine augenblickliche Wirkung bezeichnet, nach deren Entstehung eine einzige, sehr rasche und starke Hauptbewegung vorhanden ist, doch sei Grund anzunehmen, dass diese von einer Reihe an Stärke schnell abnehmender Nebenschwingungen begleitet sei. Nach SCHMIDEKAM's ⁸ Untersuchungen bringt jede instrumentelle Berührung des Trommelfells die Empfindung des Knalls hervor. Wenn man das Ohrläppchen vor den Gehörgang legt und rasch anpresst entsteht ein dumpfer Knall, der stärker und höher sich wiederholt, wenn man den Gang plötzlich wieder freigibt. Beobachtet man die Knallbewegung mit Hülfe einer vor KÖNIG's Kapseln brennenden Gasflamme (Vokalflamme) in dem rotirenden Spiegel (Fig. 28), so erkennt man, dass die feinen Kautschukmembranen, welche das ausströmende Gas von der erschütterten Luft trennen, mit mehreren, oft bis 10 Schwingungen, auf den Knall reagieren, deren erste bei weitem die grösste ist und ein sehr tiefes Wellenthal zeigt. Eine ähnliche Bewegung knüpft sich an die Verschlusslaute *p*, *b*, *k*, *t*. Die graphischen Darstellungen gestatten ein genaueres Studium; die Variation in Intensität und Schwingungsgeschwindigkeit sind sehr mannichfaltig, auch gesellen sich Theilwellen hinzu. Es dürfte dieser Geräuschgruppe eine grössere Bedeutung für unsere Gehörwahrnehmungen zukommen, als gewöhnlich angenommen wird.

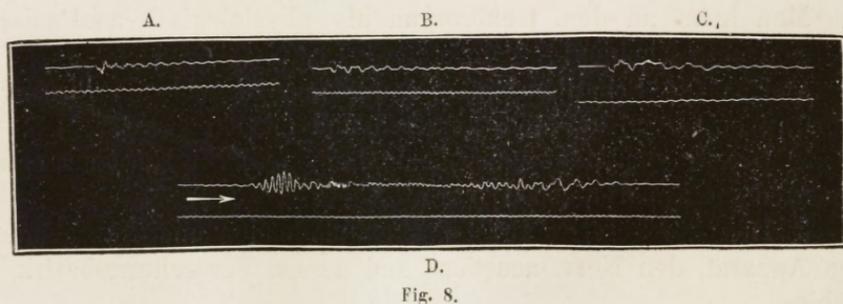


Fig. 8.

Geräusche mit nicht sehr stark gedämpfter, schwach gespannter Membran geschrieben. Die Sinuscurve rührt von einer Orgelpfeife

⁷ MOUSSON, Die Physik auf Grundlage d. Erfahrung. Thl. 1. S. 306. Zürich, Schulthess 1871.

⁸ SCHMIDEKAM, Studien. Arbeit. d. Kieler physiolog. Instituts. Schwer. 1869.

von 200 Schwing. d. Sec. her. *A* Knall eines Zündhütchens mit secundären Wellen grosser Geschwindigkeit. *B* Knall durch zwei aneinander schlagende Holzplatten, *C* durch zwei Bücher erzeugt, die Wellen sind von etwas geringerer Geschwindigkeit. *D* das Wort *schoch*, worin das *o* von einer Tonhöhe, für welche die schwach gedämpfte Membran nicht abgestimmt war.

Zischen.

Die Zischlaute dürften zu den besonders unregelmässigen Bewegungen gehören, wie obige Curve, die jedoch noch durch Eigenschwingungen der Membran etwas untreu geworden ist, zeigt. Zischende Geräusche sind theils Reihen kleinster Explosionen (z. B. das in heisser Pfanne zischende Fett), theils unregelmässige Unterbrechungen leise tönender Luftströmungen (Zischlaute). Es ist wahrscheinlich, dass sehr rasche Schwingungen der Lufttheile beim Zischen mitwirken, solche werden durch die graphischen Apparate noch nicht genügend wiedergegeben. Wenn man Gas unter so starker Pressung aus einem Brenner strömen lässt, dass eine geringe Vermehrung der Pressung ein Brausen der Flamme verursacht, so tritt das Brausen sogleich ein, wenn man zischt. Diese sog. sensitiven Flammen zeigen dann dieselbe Erscheinung, wenn man sehr hohe Töne auf sie einwirken lässt. Wenn also nicht etwa eine grosse Unregelmässigkeit der Luftbewegung, auch wenn sie langsam geschieht, das Ausströmen des Gases stört, was immerhin möglich wäre, so würde die sensitive Flamme das Vorhandensein rascher Schwingungen in den Zischlauten erweisen.

Die Funktionen des Gehörs.

Man kann an dem Gehörorgan als physiologisch-anatomische Gruppen unterscheiden:

- 1) Den die Schallbewegung empfangenden und übertragenden Apparat, bestehend aus dem äusseren und mittleren Ohr.
- 2) Den die Schallbewegung analysirenden und in Nervenerregung umsetzenden Apparat, das Labyrinth.
- 3) Den die gesetzte Erregung empfindenden und wahrnehmenden Apparat, den Nerv. acusticus und dessen Verbreitungsbezirk im Gehirn.

Diese Eintheilung giebt die Grundlinien für den Gang der nachfolgenden Darstellung.

ERSTES CAPITEL.

Die Functionen des äusseren u. mittleren Ohrs.

Ein Ueberblick über die phylogenetische Entwicklung der Theile ergiebt, dass bei Akalephen, Würmern und Mollusken, auch bei vielen Fischen keine Einrichtung gefunden ist, welche dem mittleren Ohr functionell an die Seite zu stellen wäre. Bei den höheren Krebsen findet sich, soweit nicht die Hörapparate frei an der Oberfläche stehen, entweder (Makruren) eine freie Communication des Gehörbläschens mit dem Wasser oder (Brachyuren) es sind die geschlossenen Hörbläschen an bestimmter Stelle nur durch eine dünne Haut vom umgebenden Medium getrennt.⁹

Bei den Heuschrecken finden sich membranartige Bildungen (Acridier)¹⁰ und selbst Hohlräume, die der Schall zu durchlaufen hat, ehe er die Membran und durch diese die Endapparate trifft (Locustiden)¹¹.

Bei manchen Fischen sind Zuleitungsapparate beschrieben worden, theils Kanäle, die vom Labyrinth bis dicht an die Haut führen — Selachier —, theils solche von der Schwimmblase zum Labyrinth, endlich bewegliche Knochenreihen zwischen beiden — Karpfen —, doch ist die Deutung nicht sicher zu geben.¹²

Bei vielen Amphibien und Reptilien bildet eine, mit knorpeliger oder knöcherner Lamelle (Operculum) geschlossene Fenestra ovalis den ganzen Zuleitungsapparat. Bei anderen Thieren dieser Classen und bei den Vögeln tritt Trommelfell, Columella, Paukenhöhle und Tuba Eustachii hinzu.¹³

Bei Reptilien und Vögeln tritt zuweilen ein äusserer Gehörgang auf; die Function desselben dürfte mehr die einer Ohrmuschel sein.

9 HENSEN, Stud. üb. d. Gehörorgan d. Dekapoden. Ztschr. f. wissensch. Zool. XIII. S. 319.

10 Entdeckt von v. SIEBOLD, am genauesten beschrieben v. Osc. SCHMIDT, Arch. f. microscop. Anat. II. S. 195. 1875.

11 HENSEN, Gehörorg. v. Locusta. Ztschr. f. wissensch. Zool. XVI. S. 170.

12 E. H. WEBER, de aure et auditu hominis et animalium. Lips. 1820 hat diese Bildungen der Mehrzahl nach entdeckt und für die Schallzuleitung in Anspruch genommen, doch hat HASSE, Anat. Studien. S. 583. Leipzig, Engelmann, 1873 diese Ansicht nicht bestätigen, aber auch nicht völlig eliminiren können.

13 Joh. MÜLLER, Handb. d. Physiol. II. S. 414. Coblenz 1840.

Am ausführlichsten sind neuerdings diese Verhältnisse von HASSE (12) besprochen.

Auffallend ist, dass das Operculum bei den Urodelen mit dem Ende, welches bei den höher entwickelten Thieren im Trommelfell inserirt ist, häufig mit dem Os quadratum so fest verwächst, dass an eine isolirte Schwingung dieses Theiles nicht gedacht werden kann.¹⁴

Bei den Cetaceen gehen äusserer Gehörgang und Trommelfell verloren, dagegen entwickeln sich Lufträume in der Tuba und es geht eine membranöse Lamelle von den Resten des Trommelfells aus durch die Paukenhöhle in senkrechter Richtung gegen das Foramen ovale; diese vertritt das Trommelfell. An diese Lamelle inserirt sich der sehr massive Hammer. Das Labyrinth ist durch Luft und Fett sorgfältig isolirt.

Bei manchen Säugethieren ist die Paukenhöhle zu einem grossen Hohlraum — bulla ossea —, der häufig als Resonanzraum aufgefasst wird, umgestaltet. Dabei macht der ganze Bau der Theile mehr den Eindruck des zarten und vollendeten, als derjenige vom Menschen und den Affen der alten Welt.

Bei Insectivoren und einigen Nagern tritt durch den Steigbügel hindurch die Carotis externa, eine für die Physiologie des Ohrs ziemlich unverständliche Eigenthümlichkeit.

Indem ich die Verhältnisse an Präparaten prüfe, werde ich geneigt, die functionelle Entwicklung etwa wie folgt zu präcisiren.

Es wird erstrebt den Schallwellen einen einzigen Weg zum Labyrinth anzuweisen. Dies erfordert bei Wasserthieren besondere Isolirung und scheint schwer erreichbar. Bei Landthieren ist durch die Columella eine sehr vollkommene Isolirung erreicht, zugleich wird der Apparat leichter und zarter gebaut, je ausschliesslicher der Aufenthalt in der Luft genommen wird (Vögel). Bei den Säugethieren wird das in dieser Richtung Erreichte theilweise wieder aufgegeben, da hier mehrere oft recht plumpe Gehörknöchelchen, die weniger vollkommen isolirt sind, hinzutreten. Dadurch wird neben grösserer Festigkeit eine erhebliche Dämpfung, sowie die Möglichkeit gewonnen, durch Muskelkräfte einen Wechsel der Spannungen zu bewirken.

I. Die Ohrmuschel.

Von den Functionen der Wärmeregulirung und der mimischen Thätigkeit des Ohrs wird hier abgesehen. Die auffallenden Bewegungen der Ohrmuschel vieler Thiere, z. B. des lauschenden Pferdes,

14 R. WIEDERSHEIM, Das Kopfskelett der Urodelen. S. 134 u. 153. Leipzig, Engelmann 1877. Abdr. a. d. Morph. Jahrb. III.

15 CLAUDIUS, Physiol. Bemerkungen über das Gehörorgan der Cetaceen. Kiel, Schwer. 1858.

war Veranlassung die acustische Function dieses Theils zu untersuchen. Es entstand die Frage, ob die Wahrnehmung der Richtung der Schallquelle, ob ferner eine bessere Zuleitung des Schalls zum Trommelfell durch die Muschel vermittelt werde. Die dafür sprechenden Resultate der Untersuchungen lauten zweifelhaft, die dagegen sprechenden sind präciser.

ESSER¹⁶ wies bereits nach, dass eine Reflexion der Schallstrahlen von den einzelnen Theilen der Ohrmuschel überwiegend zu einem Eindringen derselben in den Gehörgang nicht führe. HARLESS¹⁷ fand, dass durch festes Einsetzen eines $\frac{1}{2}$ " langen Glasrohrs in den Gehörgang die Schallwahrnehmung selbst dann nicht geschwächt würde, wenn der Schallerreger weit ausserhalb der Richtung der Axe des Gehörgangs lag. MACH¹⁸ hat ein Ohr mit Gehörgang aus Gyps nachgeformt und mit Trommelfell versehen, er untersuchte dann mit einem akustischen Taster (ein zugespitztes Glasrohr, welches mittelst Kautschukschlauch in seinen Ohrgang gesteckt war), ob je nach der Schallrichtung verschiedene Theile des Trommelfells verschieden afficirt seien. Es fand sich kein Unterschied. Ueberdies hat derselbe Autor¹⁹ nachgewiesen, dass bei so kleinen Flächen, wie die Muschel sie darbietet, sowohl auf Grundlage des HUYGHEN'schen Prinzips der Brechung und Reflexion, als auch nach von ihm ausgeführten Versuchen, von einer regelmässigen Reflexion einigermaßen langer Tonwellen nicht die Rede sein könne. SCHNEIDER²⁰ hat die Ohrmuschel innen und aussen ganz mit einer Wachsmasse ausgefüllt und nur den Gehörgang freigelassen. Der Ton erscheint dann bei geeigneter Richtung des Gehörganges eher verstärkt wie vermindert. Dagegen wird die Richtung der Axe des Gehörgangs für die Deutlichkeit der Wahrnehmungen von grösserer Wichtigkeit. Wenn sich aus seinen Beobachtungen etwas entnehmen lässt, ist es das, dass bei intakter Ohrmuschel die Richtung des Ohrs gegen die Schallquelle auf die Deutlichkeit der Wahrnehmung weniger Einfluss hat, als wenn der Gang mit scharfer runder Oeffnung mündet. Stets wird der Schall am deutlichsten vernommen, wenn er von der Seite her einfällt, auch bleibt es eine offene Frage, ob nicht Schwingungen von mehr als 1000 mal d. Sec. durch Reflexion an der Muschel concentrirt werden können.

16 ESSER, Mémoire. Annales des sciences naturelles. p. 1. 1832.

17 HARLESS, Artikel „Hören“ in Wagner's Handwörterb. d. Physiol. IV. 1853.

18 MACH, Bemerkungen üb. d. Function d. Ohrmuschel. Arch. f. Ohrenheilkunde. S. 72. 1874.

19 MACH u. FISCHER, D. Reflexion u. Brechung d. Schalls. Ann. d. Physik. S. 421. 1873.

20 J. A. SCHNEIDER, Diss. Marburg 1855.

RINNE²¹ experimentirte mit dem Picken einer Uhr bei mit Brodteig ausgefüllter Muschel, er fand

Hörweite	freie Muschel	gefüllte Muschel
Vorn	6'9"	2'3"
Rechts	7'2"	4'1"
Links	6'9"	5'8"
Hinten	4'9"	1'4"

so dass in diesem Fall der Einfluss der Ohrmuschel demonstrirt ist.

Es kann wenig in Betracht kommen, unter welchem Winkel das Ohr zum Kopf steht. Wenn BUCHANAN²² nach Messung an 100 Individuen zu der Ansicht gekommen ist, dass stark abstehende Ohrmuscheln ein besseres Gehör bewirken oder anzeigen und wenn man bei Musikern in der That nicht selten abstehende Muscheln findet, so dürfte dies wohl auf den intensiven Gebrauch des Ohrs und seiner Muscheln zurückzuführen sein.

HARLESS⁽¹⁷⁾ ist der Ansicht, dass die Ohrknorpel durch den Schall in Molekularschwingungen gerathen können und so eine Fortleitung der Schallbewegung in den Gehörgang hinein stattfinden könne. In den Versuchen von SCHNEIDER wäre diese Uebertragung jedenfalls sehr erschwert gewesen, eine unbefangene Prüfung lässt aber den Ausfall jener Fortleitung nicht erkennen. Die Versuche von RINNE sprechen dagegen für die Mitschwingung der Knorpel. J. MÜLLER⁽¹³⁾ findet, dass Pfeifen, welche mit einer Membran versehen sind und die Muschel berühren, merklich verstärkt gehört werden, auch mit dem Stiel an den Ohrknorpel gesetzte Stimmgabeln werden von hier aus ebensogut vernommen, als wenn sie in der Nähe des Ohrs auf die Kopfhaut aufgesetzt werden.

Die Muschel ist also wohl nicht ganz gleichgültig für die Gehörschärfe und die Gehörschwärmungen, aber ihre Leistungen sind klein.

II. Der Gehörgang.

Länge vom inneren Rande der Concha gemessen 24 mm., knorpeliger, noch in der Haut liegender, mit Incisurae Santorini versehener Theil 8, knöcherner 16 mm. Durchmesser des ersteren 5 und 8, des letzteren 6 und 10 mm. Die Haut, im knorpeligen Theil mit glandul. cerumin. versehen, ist 1,5, am Trommelfell 0,1 mm. dick. Nerven: Ram. meat. audit. extern. vom Auriculo-temporal des Trigemini und Ram. auricul. N. vagi. Bewegung des Kiefers bewirkt eine kleine Aenderung im Querschnitt des knorpeligen Gehörgangs⁽¹⁷⁾.

21 RINNE, Ztschr. f. rat. Med. (3) XXIV. S. 12. 1865.

22 BUCHANAN, Meckel's Arch. f. Anat. u. Physiol. S. 488. 1825.

Der Gehörgang schützt das Trommelfell gegen von aussen drohende Gefahren. Er ist so gewunden, dass das Trommelfell in grader Linie nicht erreicht werden kann, wenn nicht der knorplige Gehörgang gestreckt und nach oben hinten gezogen wird. Der äussere Theil des Ganges ist von empfindlichen Wollhaaren bekleidet, leise Berührung derselben wird als lästiger Kitzel empfunden. Leise Berührung der mittleren Theile des Ganges erzeugt ein starkes Unlustgefühl, wie solches, die tieferen Theile der Mundhöhle kaum ausgenommen, an den anderen Ostien des Körpers nicht oder nicht so energisch und vom Vordringen abmahnd angetroffen wird (u. A. SCHMIDEKAM²³). Unter Umständen kann sich dies Gefühl zu Uebelkeit und Ohnmachtsanfällen steigern. Weil ähnliche Zustände durch die Vagusäste des Magens hervorgerufen werden können, ist es nicht unwahrscheinlich, dass die Ram. auricul. N. vagi diese Empfindung auslösen.

Während die innerste Abtheilung des Gehörgangs zwar fettig aber trocken ist, wird die äussere von Ohrenschmalz überzogen. Dies Excret ist eine Mischung von Sebum, Schweiss und Zellen der Epidermis und der Drüsen, nebst Härchen. Es enthält einen in Wasser löslichen, gelben, bitteren Stoff, der schon in den Schweissdrüsen gesehen wird und von dem zu sagen ist, dass er nicht die Reactionen von Gallenbestandtheilen giebt.²³ Nach PETREQUIN²⁴ hängt die Consistenz des Schmalzes von dem Gehalt an Kaliseifen ab. Eine direkte Beziehung dieses Stoffs zum Hörvermögen, an welche BUCHANAN und A. glaubten, ist nicht anzunehmen. Ausser dem *Acarus folliculorum* ist nur selten ein Thier (Insectenlarven, *Sarcophaga* sp.) im Gehörgang gefunden. Da derselbe so leicht zugänglich ist und sein muss, mag das Cerumen einen Schutz gegen solche Eindringlinge abgeben. Normal häuft sich kein Sekret am Trommelfell an; was dieses davor schützt, ist unbekannt.

Durch die Länge des Ganges werden Trommelfell und Paukenhöhle gegen schroffen Temperaturwechsel geschützt. Nach MENDEL²⁵ ist der Gehörgang 0,3⁰ niedriger temperirt als der Mastdarm.

Resonanz des Gehörgangs.

Wenn ein Stoss die Luft vor dem Gehörgang trifft, wird der selbe ohne Schwierigkeit durch die Luft des Gehörgangs bis zum

²³ KÖLLIKER, *Microscop. Anat.* II. S. 176. Leipzig, Engelmann, 1850 und BERZELIUS, *Thierchemie* übersetzt v. WÖHLER. S. 536. Leipzig 1840.

²⁴ PETREQUIN, *Compt. rend.* I. S. 940. II. S. 957. Paris 1869. In dem härteren Cerumen der Greise findet sich mehr unlösliche Materie 17:12. Im Cerumen des Hundes, Kalk-, des Pferdes, Magnesia-Seife.

²⁵ MENDEL, *Arch. f. pathol. Anat.* LXII. S. 132. 1875.

Trommelfell fortgepflanzt und von dort theilweise wieder nach aussen zurückgeworfen werden. Dieser Vorgang kann jedoch unter Umständen durch Bildung stehender Wellen eine Modification erleiden. HELMHOLTZ (6. S. 175) hat nämlich darauf aufmerksam gemacht, dass gewisse hohe Töne im Ohre stark resoniren, was aufhört, resp. sich ändert, wenn man den Gang künstlich verlängert oder das Trommelfell anspannt. Es handelt sich hier also um Resonanz des Gehörgangs, aber dieselbe hängt nicht allein von dessen Länge und Weite, sondern auch von dem Zustand des Trommelfells vielleicht auch dem Luftraum im Cavum tympani ab.* Man hat bei diesen Tönen neben der grösseren Stärke eine schwirrende Empfindung im Ohr. Da man dieselbe Empfindung hat, wenn tiefere Töne äusserst stark (vom Windkasten der Sirene) in das Ohr geleitet werden (S), so wird letztere Empfindung auf grosse Excursionen des Trommelfells und der Gehörknöchelchen zu beziehen sein. Der Gehörgang wird allemal, wenn die betreffenden Töne in einer Klangmasse vorkommen, dieselben durch Resonanz verstärken. Wir werden daher solchen Schall in etwas anderer Weise vernehmen müssen, als er in der äusseren Luft vorhanden ist.

III. Cranio-tympanale Leitung.

An den Gehörgang knüpft sich eine für die Lehre von der Kopfknochenleitung wichtige Erfahrung.²⁶ Wenn man eine schwingende, ziemlich dicht an das Ohr gehaltene Stimmgabel eben nicht mehr hört, bemerkt man den Ton wieder, wenn man ihren Stiel an die Zähne setzt, verschwindet dann der Ton, so hört man ihn von neuem, wenn man den Gehörgang eines Ohres schliesst und zwar in diesem Ohr (RINNE²⁷); verklingt er auch dann, so tritt er noch wieder auf, wenn der entsprechend geformte Stiel in den Gehörgang hineingeschoben wird.**

Die Eigenthümlichkeit, dass von den Kopfknochen aus die Gabel so gut gehört wird, hat man ursprünglich durch die Annahme einer directen Uebertragung der Schallwellen auf das Labyrinth, die

* HELMHOLTZ (6) findet als Resonanzton für sein rechtes Ohr c^{IV} , für sein linkes f^{IV} , ich finde rechts d^{IV} , links a^{IV} , eine Frau hatte rechts f^{IV} , links g^{IV} . Durch Spannung d. Trommelfells konnte SCHAEPFINGER (99) den Eigenton von 5340 auf 3700 Schwingungen herabsetzen.

26 WHEATSTONE, Quarterly Journ. of Science. N. S. II. 1827, hat, wie es scheint, die Beobachtung zuerst gemacht.

** Eine Stimmgabel von 1000 Schwingungen höre ich z. B. an den Zähnen 4'', nach Schluss des Ohrs weitere 4'', in den Gehörgang geschoben noch 1 bis 3''. Das Ohr muss natürlich gesund sein, auch ist zu bemerken, dass im Alter sich diese Wahrnehmungen verschlechtern.

scheinbar günstigste Bedingung intensiver Tonzuleitung, erklären wollen. Diese Ansicht kann nicht aufrecht erhalten werden. RINNE²⁷ wies nach, dass eine Verengerung des Gehörgangs schon sehr merklich, ein vollständiger Verschluss des Ohrs ohne Compression der Luft im Gange, am lebhaftesten die Verstärkung des Gehöreindrucks hervorruft. LUCÆ²⁸ hat durch directes Experiment mittelst graphischer Methode, nach dem Vorgang von POLITZER, nachgewiesen, dass Trommelfell und Gehörknöchelchen bei Zuleitung des Tons vom Warzenfortsatz in Schwingung gerathen und zwar am stärksten bei uncompressirter Luft. POLITZER²⁹, welcher über den Gegenstand viele Experimente gemacht hat, weist darauf hin, dass der Proc. Folianus des Hammers (der ja in der That im Alter fehlt) bei der Knochenleitung aufs Tympanum wirksam sein dürfte. Er hat deutlich nachgewiesen, dass der Ton nicht direct von den Schädelknochen zum Os petrosum, sondern auf dem Umwege: Trommelfell, Gehörknöchelchen, Foramen ovale dorthin gelange. Das Labyrinth wurde nämlich mit Luft gefüllt, wieder verschlossen und vom Porus acusticus internus aus auscultirt. Der von dem Knochen aus zugeleitete Ton wurde schwächer gehört, sobald das Ambos-Steigbügel-Gelenk getrennt wurde, darauf konnte die Wahrnehmung des Tons deutlich verstärkt und geschwächt werden, wenn der Ambos abwechselnd an den Steigbügel angelegt und wieder entfernt wurde. Nach SCHMIDKAM (S) ist die Tonwahrnehmung vom Schädel aus besonders gut bei völlig mit Wasser gefülltem, äusserem Gehörgang.

Da die Knochenleitung unbestreitbar zu einem sehr erheblichen Theil durch den Apparat der Paukenhöhle zu dem Labyrinth geht, dürfte es richtig sein den Ausdruck cranio-tympanale Leitung für den Vorgang festzuhalten. In wie weit eine directe Knochenleitung Gehörempfindung hervorbringt, ist noch unerforscht.

Die Wirkung eines lockeren Verschlusses des Gehörgangs wollte RINNE dadurch erklären, dass hier die störende Reflexion der Tonwelle an der offenen Mündung vermieden werde; jedoch die Reflexion an geschlossener Mündung kann ebensowohl zu Störungen durch Interferenz der Wellen führen. MACH³⁰ hat dagegen durch Auscultation den Nachweis geführt, dass bei Knochenzuleitung der Ton

27 RINNE, Prager Vjschr. f. pract. Heilk. I. S. 71. 1855.

28 LUCÆ, a) Arch. f. pathol. Anat. XXV. S. 332. 1862. b) TRÖLTSCH's Arch. f. Ohrenheilkunde I. S. 303. 1864. Ferner über diese Frage c) Centralbl. f. d. med. Wiss. 1863. No. 40, 41. d) daselbst 1865. No. 13 und Arch. f. pathol. Anat. XXIX. S. 33. 1864.

29 POLITZER, TRÖLTSCH's Arch. I. S. 318. 1864.

30 MACH a) Sitzgsber. d. Wiener Acad. 2. Abth. S. 283. 1863. b) ebenda 2. Abth. S. 342. 1864.

mit erheblicher Stärke aus dem Gehörgang heraus in die Luft entweiche, und er wie POLITZER finden in der Verhinderung dieses Austritts den Grund der verstärkten Schallwahrnehmung bei Verschluss des Ohrs. Wird durch stärkeren Druck auf die Luft des Ganges, das Trommelfell aus der normalen Stellung gebracht, so wird der Ton wieder schwächer gehört, was nach dem Gesagten nicht mehr auffallen kann.

Wenn Schallwellen vom Knochen aus sich dem mittleren Ohre stark mittheilen, so wird dieser Process auch in umgekehrter Richtung vor sich gehen müssen. Wirklich findet MACH, dass der in ein Ohr dringende Ton aus dem anderen wahrnehmbar herausklingt. Daraus ist zu entnehmen, dass die noch so vollkommene Verschlussung eines Ohres niemals das Vermögen desselben, äussere Tonquellen wahrzunehmen, aufheben kann, so lange das Trommelfell des anderen Ohres frei functionirt.

IV. Die Functionen des mittleren Ohrs.

Im Bereich des mittleren Ohrs werden die akustischen Schwingungen der Luftmoleküle auf den festen Leitungsapparat übertragen und von diesem dem Labyrinth zugeführt. Die anatomischen Theile, welche direct für diesen Process zur Verwendung kommen, sind das Trommelfell und die Gehörknöchelchen. Accessorische Bedeutung haben dabei die Trommelhöhle, die Muskeln der Gehörknöchelchen und die Tuba Eustachii, welche später besprochen werden.

1. Bau des Trommelfells und der Kette der Gehörknöchelchen.

Indem die bis jetzt als functionell wichtig erkannten Einrichtungen dargelegt worden, ist die allgemeine Bekanntschaft mit dem Bau der Theile vorausgesetzt.*)

* Die zahlreichen anatomischen Nachweise werden hier vereint im Voraus zusammengestellt:

31 JOSEF GRUBER, D. feinere Bau d. Ringwulstes am Trommelfell. Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. No. 2. Berlin 1869.

32 HELMHOLTZ, D. Mechanik d. Gehörknöchelchen u. d. Trommelfells. Arch. f. d. ges. Physiol. I. S. 1.

33 TRÖLTSCHE, Beitr. z. Anat. d. menschl. Trommelfells. Ztschr. f. wiss. Zool. 1858.

34 HYRTL, Vergl. anat. Unters. üb. d. innere Gehörorgan. Prag, Ehrlich. 1845.

35 TRAUTMANN, D. gelbe Fleck am Ende des Hammergriffs. TRÖLTSCHE's Arch. S. 99. 1876.

36 GERLACH, microsc. Studien a. d. Gebiet d. menschl. Morphologie. Erlangen, Enke, 1858.

37 TOYNBEE, On the structure of the Membrana tympani. Philosophical Transactions 1851.

38 KESSEL, D. äussere u. mittlere Ohr in STRICKER, Lehre v. d. Geweben. Leipzig, Engelmann. 1872.

Das Trommelfell inserirt sich in einer Rinne des Knochens, welche mit Faserknorpel ausgelegt ist ⁽³¹⁾. Die Rinne, welche oben offen und mit dem RIVINI'schen Ausschnitt (HELMHOLTZ ³²) versehen ist, verläuft spiral, so dass der Trommelfellansatz hinten oben mehr lateral steht, wie vorn oben. Ein durch den Trommelfellansatz gelegtes Planum schneidet die Axe des Gehörgangs in einem nach unten offenen Winkel von etwa 150° . Das Planum beider Ohren convergirt in der Weise, dass es sich unten unter einem Winkel von 125 bis 135° , nach vorn unter spitzem Winkel schneiden würde. Oben, wo die Knochenrinne fehlt, geht die Haut des Gehörgangs mit etwas verstärkten Faserzügen ohne Absatz als Membr. flaccida Shrapnelli bis zum Proc. brevis mallei heran.

Die längere Axe der ovalen Trommelfellringebene geht von hinten oben nach vorn unten und misst $9,5$ — 10 mm., die kurze, darauf senkrechte, 8 mm. ⁽³³⁾ Abgesehen von dem ganz modificirten Trommelfell der Cetaceen, schwanken die für verschiedene Säugethiere angegebenen ⁽³⁴⁾ grössten Durchmesser zwischen 17 (Löwe) und $1,6$ mm. (Hufeisenmase).

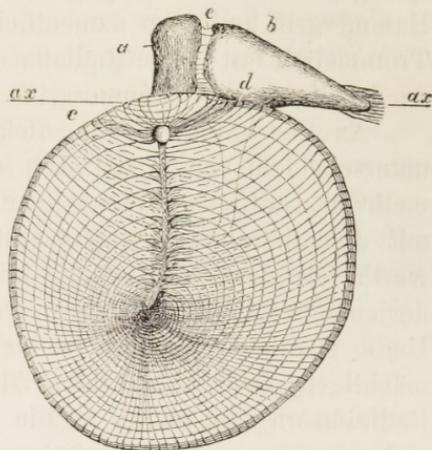


Fig. 9. Schematische Darstellung der Fläche des linken Trommelfells vom Gehörgang aus, viermal vergrößert. Der dunkelste in der Tiefe liegende Theil ist der Umbo. *a* der Hammerkopf, der helle Fleck darunter sein Proc. brevis sc. obtusus, zwischen ihm, dem oberen Rande des Trommelfells und *cd* liegt die Membr. flaccida. *b* Ambo, dessen langer Fortsatz durchscheint, *e* Hammer-Ambo gelenk. *ax* Drehungsaxe der beiden Knochen.

39 PRUSSACK, Zur Anat. d. menschl. Trommelfells. TRÖLTSCHE'S Arch. III. S. 255. 1867.

40 BRUNNER, Beiträge z. Anat. u. Histologie d. mittleren Ohrs. Leipzig, Engelmann. 1870.

41 GRUBER, anat.-physiol. Studien üb. d. Trommelfell u. d. Gehörknöchelchen. Wien, Gerold. 1867.

42 POLITZER, Wochenbl. d. k. k. Gesellschaft d. Aerzte. Wien 1868 (nicht eingesehen).

43 RÜDINGER, Notizen üb. d. Histologie d. Gehörknöchelchen. Monatsschr. f. Ohrenheilkunde 1869.

44 URBANTSCHITSCH, Z. Anat. d. Gehörknöchelchen. TRÖLTSCHE'S Arch. XI. S. 1.

45 RÜDINGER, Beiträge z. Histol. d. Gehörorgans. München 1870. Auszüge in Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. 1871 u. 73.

46 BRUNNER, D. Verbindung d. Gehörknöchelchen. Arch. f. Augen- u. Ohrenheilkunde. 1873.

47 MAGNUS, Beitr. z. Anat. d. mittl. Ohrs. Arch. f. pathol. Anat. XX. 1861.

48 WEBER-LIEL, Verhandl. d. physiol. Gesellsch. Berlin. 2. Jan. 76.

49 EYSELL, Beitr. z. Anat. d. Steigbügels. TRÖLTSCHE'S Arch. V. S. 237. 1870.

50 HENKE, D. Mechanismus d. Gehörknöchelchen. Ztschr. f. rat. Med. 1868.

Das Trommelfell bildet einen nach dem Gehörgang zu geöffneten, schräg abgeschnittenen, unregelmässigen Trichter von etwa 125⁰ Oeffnung, dessen Spitze (Umbo) an der Spitze des Hammergriffs liegt. Der untere Theil der Trichterwand, dessen Flächeninhalt fast ein Drittheil des Ganzen ausmacht, steht nahe senkrecht zur Axe des Gehörgangs, der obere fast parallel derselben. Die Meridianlinien des Trichters springen etwas convex gegen die Höhlung desselben vor. Mit dem Hammergriff und zwar namentlich dem Ende desselben, verwächst das Trommelfell fest; seine Radialfasern gehen in das Perichondrium einer an der Kante des Hammergriffs liegenden Knorpelmasse ⁽³⁵⁾ ein.

An der kaum 0,1 mm. dicken Membran kann man 6 Lamellen unterscheiden, von aussen nach innen 1) Epidermis, 2) Corium, 3) Lamelle der radialen, 4) Lamelle der circulären Fasern, 5) Schleimhaut mit eigenthümlichen Gefässpapillen, 6) Pflasterepithel. Beachtenswerth ist, dass die Lamelle mit Radialfasern sich recht leicht von derjenigen mit Circulärfasern trennen lässt. Erstere ist nach dem Umbo zu dicker, letztere ist hier nicht deutlich, an der Peripherie mächtiger, fehlt aber wieder dicht an der Knochenrinne ⁽³⁶⁾. Die Radialfasern sind steife, an die Fasern im Faserknorpel erinnernde, sich nur unter spitzem Winkel an einander legende Bildungen, denen übereinstimmend eine geringe Dehnbarkeit nachgesagt wird. Nicht dasselbe gilt für die Circulärfasern, welche nach ihrer Loslösung sich verkürzen ⁽³⁷⁾. Sie gehen nach TRÖLTSCHE ⁽³³⁾ oberhalb des Proc. obtusus lateral, unterhalb desselben medial über den Hammergriff hin, ohne sich anzusetzen, doch sind die Autoren darüber verschiedener Ansicht ⁽³⁸⁻⁴²⁾. Elastisches Gewebe ist im Trommelfell kaum nachweisbar ⁽³²⁾. Aus einer Spannung der Circulärfasern würde sich die trichterförmige Gestalt der Membran, die für das Lumen des Ganges zu gross ist, herleiten lassen. Das eigentlich die Form gebende ist jedoch der Hammergriff. Ueber die Mitte der Membran nach unten übergreifend, giebt er dem Umbo seine excentrische Lage, etwas gekrümmt und mehr in dem vorderen Abschnitt verlaufend, theilt er das mittlere Drittheil des Trommelfells ungleich; endlich durch den Proc. obtusus das obere Drittheil vortreibend, ertheilt er dem Ganzen eine recht unregelmässige Gestalt. HELMHOLTZ ⁽³²⁾ hat jedoch durch die Methode der höheren Analysis gezeigt, dass die Form des menschlichen Trommelfells unter Annahme einer, durch Luftdruck allein gespannten Membran mit unausdehnbaren Radialfasern annähernd als Theil einer bestimmten Fläche 4. Grades sich darstellt.

Die Gehörknöchelchen zeigen bei den Säugethieren man-

nichfache Gestaltunterschiede (34). Bei den Cetaceen von massivstem und am meisten gedrunenem Bau, sind sie bei den Nagern sehr zart; die des Menschen stehen mehr auf Seite der massiveren Formen. Aus der Form der Knöchelchen sind aber kaum Momente für die Physiologie zu entnehmen. Sie bestehen aus spongiöser Substanz und sind mit ziemlich compacter Rindenschicht versehen.

Der Hammer steht mit der schmalen überknorpelten Kante seines, in sagittaler Richtung comprimierten, etwas gedrehten Manubriums im Trommelfell, nur am Knorpel des Proc. obtusus scheint die Verbindung lockerer zu sein. Von letzterer Stelle aus biegt sich der Hals des Hammers medialwärts stark ab. Hierher gehen vom Rande des RIVIN'schen Ausschnitts aus Bandmassen, deren Verhältnisse physiologisch wichtig sind. Dieselben werden erläutert durch die Fig. 11.

Unter dem von der Spina tympanica major entspringenden und zum Hammer verlaufenden Lig. anterioris mallei der Autoren liegt der Processus Folianus, den ich mit URBANTSCHITSCH (44) beim Erwachsenen noch ziemlich häufig finde, weiter unten verläuft die Chorda tympani. Das zweite, von HELMHOLTZ (32) als Lig. mallei externum bezeichnete Band geht vom Rande des RIVIN'schen Ausschnitts aus zum Hammer hinüber. Ueber diesem Bande und mit ihm parallel geht eine Schleimhautfalte von der Wand des Cavum tympani zu Ambos und Hammer, durch welche zwei als vordere und hintere Trommelfelltaschen bezeichnete Schleimhautausbuchtungen von einander geschieden werden. Ein Lig. superius Fig. 10 L. S. beschränkt die Beweglichkeit der Knöchelchen nach abwärts, wie überhaupt alle Bänder stärkere Bewegung der Knöchelchen in jeder Richtung ausschliessen. HELMHOLTZ unterscheidet als Axenband des Hammers

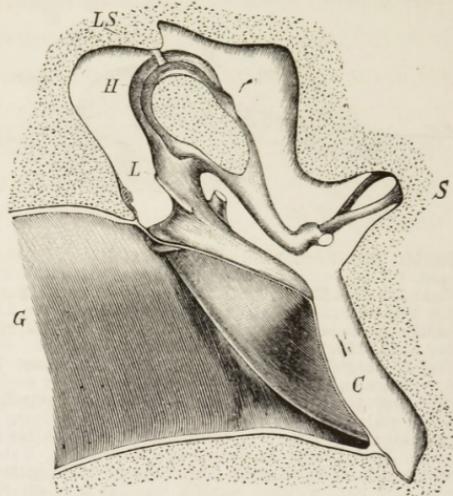


Fig. 10. Durchschnitt des Gehörgangs und der Trommelhöhle dicht hinter dem Hammerstiel und in der Richtung desselben, vom linken Ohr, viermal vergrößert. G Gehörgang, durch das Trommelfell gegen das Cavum tympani C abgegrenzt. S der Steigbügel mit seiner Nische und dem Sehnenansatz des Stapedius, das Foramen ovale liegt noch unverletzt nach vorn von der Schnittfläche. Die Schnittflächen des Knochens sind überall punktiert, ebenso die Fläche des Ambos wo der kurze Fortsatz desselben abgeschnitten ist, derselbe würde auf den Betrachtenden hin verlaufen sein. Am Amboskörper sieht man beiderseits die Sperrzähne vorspringen. H der Hammer, an dessen Halse bei L eine Leiste vorspringt, an welche sich die Ligamente ansetzen. An der Wand des Cavum tympani, der Leiste L gegenüber, sieht man die Reste dieser Ligamente. Zwischen dem langen Fortsatz des Ambos und dem Hammerstiel sieht man die Sehne des Tensor tympani. Umbo, Proc. obtusus und Membr. flaccida zwischen letzterem und der Wand des Gehörgangs sind ohne Signatur kenntlich. LS Ligamentum superius.

die am weitesten nach hinten liegenden Fasern des Lig. externum (vergl. Fig. 11) zugleich mit dem vordersten innersten Faserzug des

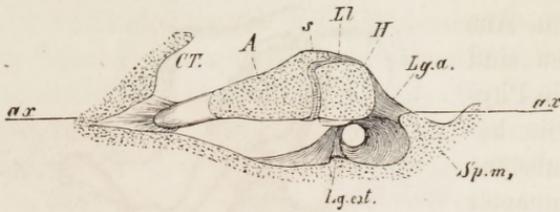


Fig. 11. Fast horizontaler Durchschnitt durch das Cavum tympani, *CT* des rechten Ohrs, viermal vergrössert. Der Schnitt geht dicht über dem Rivini'schen Ausschnitt senkrecht gegen die Ebene der Fig. 10 und um ein geringes höher wie die Linie *ax* dort, welche in dieser Fig. wieder angegeben ist. *H* medialer Rand der Schnittfläche des Hammerkopfs. *A* Ambos, dessen kurzer Fortsatz angeschnitten ist und durch Bandmasse befestigt mit der Spitze in seiner Knochenrinne ruht. Der mediale Gelenkzahn des Ambos ist von dem Schnitt grade getroffen. Von der Spina major, *Sp. m.* der Wand des Cavum tympani geht das Ligamentum anterius, *Lg. a.* zum Hammer sich bis zum Lig. laterale des Hammer-Ambosgelenks fortsetzend. Ueber dem Rivini'schen Ausschnitt geht zum Hammer ein Ligamentum externum, *Lg. ext.*, welches ähnlich wie das Lig. anterius aus einer hohen, rings in grösserer Ausdehnung von der Knochenwand entspringenden Fasermasse sich zusammensetzt. Die kanalförmige Öffnung zwischen beiden Bandmassen führt auf die Membr. flaccida.

Lig. anterius auf Grund des Nachweises, dass 1) die einzelnen Faserzüge der Ligamente bei den Bewegungen des Hammers sich sehr verschieden spannen, also functionell voneinander geschieden werden können, 2) die Drehungsaxe des Hammers annähernd in der Richtung der genannten Fasern verläuft, 3) der vom Ambos gelöste Hammer selbst nach der Durchschneidung des Tensor tympani mit

Hilfe der genannten Ligamente noch ziemlich gut in seiner normalen Stellung befestigt erscheint. Angesichts der ziemlich beträchtlichen Knickung gegeneinander, welche diese Bandtheile in der Regel aufweisen, ist es schwer dieser Ansicht über ihre Function völlig zuzustimmen. Vielleicht dürfte das Lig. externum nur als Hemmungsband gegen eine starke, medianwärts gerichtete, Bewegung des Hammerkopfes, und als Haftband gegen die Pressung, welche das Trommelfell auf den Proc. obtusus ausübt, aufzufassen sein.

Der Hammer artikulirt mit dem Ambos durch ein etwas eigenthümliches Sperrgelenk, welches, nachdem schon RINNE (27) auf die Eigenthümlichkeit desselben aufmerksam gemacht, von HELMHOLTZ eingehend beschrieben und zuerst physiologisch gewürdigt ist.* Denkt man sich vor das Gelenk des Ambos *A* Fig. 12 einen Cylinder *B* (etwa eine Wachskerze) senkrecht durch die Ebene des Papiers gehend gestellt, denkt man ferner diesen Cylinder, ohne von dem Ambosgelenk entfernt zu sein, um die Axe *ax* in der Richtung des Pfeils bis zur neuen Stellung *B'* gedreht, so wird sich die Gelenkfläche des

* Obgleich die physiologische Wahrheit der Darstellung von HELMHOLTZ leicht zu bestätigen ist, gelang es mir nicht die anatomische Darstellung in Wort und Bild so zu verstehen und zu bestätigen, dass ich sie hier wiedergeben könnte. Die Beschreibung ist also den eigenen Präparationen entnommen worden, ich mache aber darauf aufmerksam, dass wahrscheinlich mancher Leser aus der von HELMHOLTZ's Meisterhand gelieferten Beschreibung (32) ein besseres Verständniss gewinnen kann.

Ambos eine Gangfläche in den Cylinder, welcher den Hammerkopf repräsentiren möge, eingegraben haben. In dieser Weise ist in der That die Gelenkfläche zwischen Hammer und Ambos beschaffen. Solches Gelenk hat die Eigenthümlichkeit, dass es sich gegen jede in Richtung des Pfeils weitergehende Bewegung sperrt und dabei entweder eine Deformation des Cylinders oder ein Mitnehmen des Ambos erfolgen muss, während der Rückwärtsbewegung in die alte Lage *B* natürlich kein Hinderniss erwächst. Die Theile, welche der Vorwärtsbewegung Widerstand leisten, werden als Sperrzähne bezeichnet. Sperrzahn des Hammers ist also die Cylinderfläche bei *S*. Sperrzähne des Ambos sind die beiden Ecken seiner Gelenkfläche Fig. 11 *s*.

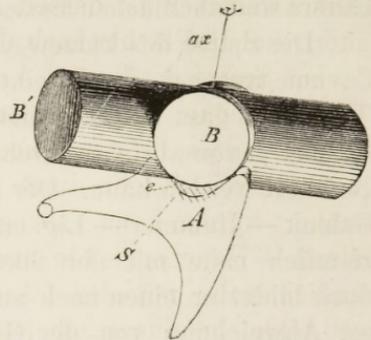


Fig. 12. Schema für die Bildung des Hammer-Ambos-Gelenks. Der Pfeil bei *ax* geht von rechts über der Ebene des Papiers nach links.

Eine Vergleichung der Figuren 11 und 12 unter Berücksichtigung der Drehungsaxe *ax* wird deutlich machen, dass der Hammerkopf sich nicht lateralwärts, oder was dasselbe ist, das Trommelfell sich nicht medialwärts bewegen kann, ohne die Gelenkflächen fest aneinander zu pressen, während Bewegung von Hammer und Trommelfell in umgekehrter Richtung durch die Form der Gelenke nicht gehindert wird und Ambos-Steigbügel nicht mit sich zu reissen braucht. Nach HELMHOLTZ lässt sich der Hammer etwa 5° zurückdrehen ohne den Ambos mitzunehmen; dadurch wird die Gefahr beseitigt, dass der Steigbügel aus seiner Nische herausgerissen werde, weil das Trommelfell, das stärkste Band des Apparates, erschlafft, und die Bewegung nicht hindert. Diese Verhältnisse lassen sich sowohl am frischen wie am trocknen Knochen demonstrieren, es ändert wenig, dass sich ein Meniscus von einer Seite her zwischen die Gelenkflächen einschiebt (RÜDINGER ⁴⁵). Die Drehung setzt eine gewisse Schloffheit der Gelenkbänder voraus; deren Fasern gehen, wie schon BRUNNER (⁴⁶) andeutete, in der Weise schräg von einem Knochen zum andern (Fig. 12, *e*), dass sie bei der Rückwärtsdrehung erschlaffen. Die Kapsel, welche Ambos und Hammer verbindet, ist schwach, jedoch in den stumpfen Winkeln des Ambosgelenks (Fig. 9 bei *d*) liegen kurze dicke Seitenbänder. Die Stärke derselben erscheint bei mechanischer Prüfung geringer als sie wirklich ist, weil bei jedem Zuge die Gelenkfläche als Hypomochlion für einen langen Kraftarm wirkt, weshalb die Bänder leicht brechen; überdies trägt der Luftdruck

bei, die Entfernung der Gelenkflächen voneinander zu hindern. Bei den Thieren sind die Verhältnisse dieses Gelenks sehr wechselnd, bei den Meerschweinchen ist dasselbe völlig verknöchert⁽³⁴⁾, bei den Wiederkäuern sind die Flächen flach, dagegen die Gelenkbänder sehr massig⁽⁴⁹⁾.

Die Spitze des kurzen Ambosschenkels ist an der Wand des Cavum tympani durch einen mächtigen Bandapparat so befestigt (Fig. 11), dass sie den Knochen nicht berührt, sondern um 0,1 bis 0,2 mm davon absteht, durch Pressung jedoch der Knochenwand mehr genähert werden kann. Der ganze Apparat: Spitzenband — Ambos — Gelenk — Hammer — Lig. mallei anterior hat eine Zugrichtung, welche ziemlich nahe mit der faktischen Drehungsaxe *ax* zusammenfällt, doch bildet er einen nach aussen offenen, stumpfen Winkel. Zu dieser Abweichung von der Graden zwingt der Druck des Trommelfells auf den Proc. obtusus, sowie der Zug des Tensor tympani; beschränkt wird sie durch die Straffheit der Bänder selbst und durch das Lig. externum und superius. Bei Bewegungsversuchen findet sich, dass, während das Trommelfell einwärts geht, Hammerkopf und Amboskörper neben der Drehung um die Axe sich etwas senken und etwas nach rückwärts gehen, dass also eine völlig feste Axe für die Bewegung nicht hergestellt ist. Diese kleinen Verschiebungen dürften sich aus der ungleichen Länge der Radiärfasern zwischen Trommelfelling und Hammerstiel (Fig. 9) erklären. HELMHOLTZ leitet die Verschiebungen aus der Lage des Axenbands des Hammers ab; diese Verhältnisse werden sich gegenseitig bedingen und modeln.

Der lange Schenkel des Ambos, welcher die Bewegung auf den Steigbügel zu übertragen hat, steigt in der Art nach abwärts (vergl. Fig. 9, 13.), dass ein vertikales Planum durch die Axe *ax*, die Spitze des Manubrium mallei, und durch beide Ambosschenkel gelegt werden kann. In Folge dieser Lagerung kann das Hammer-Ambos-System auf eine rechtwinklige Dreiecksfläche reducirt gedacht werden, dessen spitzwinklige Ecken an der Spitze des Manubrium mallei und des kurzen Ambosschenkels liegen, während die zwischen den beiden Punkten verlaufende Hypothenuse Fig. 13 *aa* die Spitze des langen Ambosschenkels tangirt. Der rechte Winkel liegt im Hammerkopf in der Axe *ax*, während die eine Kathete im Manubrium, die andere in *ax* verläuft.

Die Hypothenuse kommt als einarmiger Hebel zur Wirkung, das Hypomochlion desselben liegt an der Spitze des kurzen Ambosschenkels, die Spitze des langen Schenkels (Steigbügel!) ist Angriffspunkt der Last, die Spitze des Manubrium Angriffspunkt der Kraft, welche senkrecht auf die Ebene des Dreiecks wirkt. Weil keine völlig feste

Axe existirt, kann sich das Manubrium für kleine Bewegungen parallel mit sich selbst verschieben. HELMHOLTZ⁽³²⁾ hat die ganze Länge des Hebels *aa* zu $9\frac{1}{2}$ mm. gefunden, den kürzeren Arm zwischen den Ambosschenkeln zu $6\frac{1}{3}$ mm., daraus folgt, dass die Excur-sion der Last, also des Steigbügels, $\frac{2}{3}$ von der der Manubriumspitze, der Druck auf den Stapes $1\frac{1}{2}$ mal die Kraft, welche auf die Spitze des Manubriums wirkt, sein muss.

Rechtwinklig und medialwärts geht von der Spitze des langen Ambosschenkels ein Knochenstäbchen ab, dessen verbreitertes Ende (Ossiculum Sylvii) dick überknorpelt eine convexe Fläche bildet, auf welcher der Steigbügel, durch einen Meniscus artikulirend, aufsitzt.

Der Steigbügel ist zart gebaut; es macht den Eindruck, als wenn geringe Masse eine Bedingung seiner guten Function sei. Sein Kopf ist durch starke Ligamente⁽⁴⁷⁾ und durch Sehnenfasern des Stapedius⁽⁴⁵⁾ mit dem Ambos verbunden.

Die sehr dünne, mit Knorpel überzogene Basis sitzt in einem kurzen Knochenkanälchen, dem ovalen Fenster, dessen überknor-

pelte Flächen einer starken, von der Basis stapedis rings abgehenden, Annularmembran zum Ansatz dienen. Die Membran ist 0,14 bis

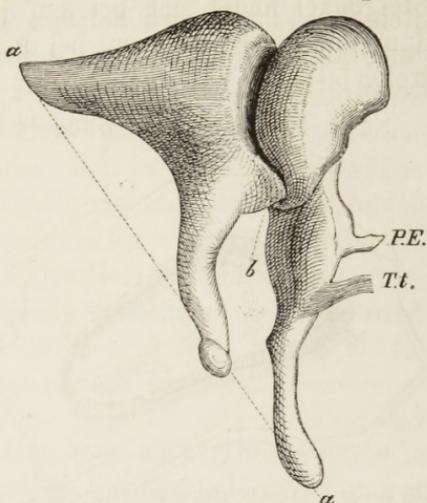


Fig. 13. Nach HELMHOLTZ, die Hebelwirkung der Gehörknöchelchen zeigend. *aa* Hypothenuse, *PE* Processus Folianus, *Tt* Tensor tympani, *b* Sperrzahn des Ambos; die Knöchelchen von der Paukenhöhleseite gesehen.

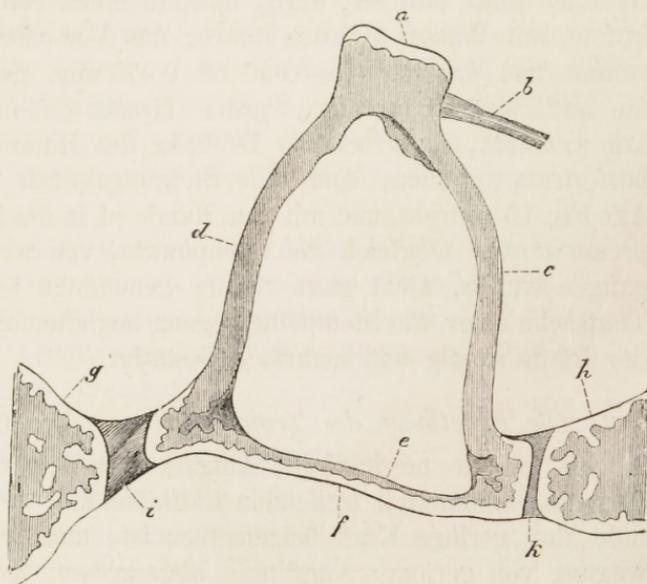


Fig. 14. Schnitt durch den Stapes nach EYSELL. *a* Stapesköpfchen, *b* Stapediussehne, *c* hinterer, *d* vorderer Schenkel, *e* Grundplatte, *f* Knorpelmantel, *g* vorderer, *h* hinterer Theil des Fensterandes, *i* vordere, *k* hintere Seite des Lig. annulare proprium.

0,5 mm. dick; in ihrem vordersten Abschnitt, wo sie schräg verläuft, mindestens 0,1 mm., weiter hinten bis zu 0,015 mm. herab, breit. Der Steigbügel findet sich bei den Thieren stets in ligamentöser Verbindung mit dem Fenster, nur bei der Seekuh soll eine Verknöcherung eintreten⁽³⁴⁾, ein Fall der näherer Untersuchung bedarf.

Die Platte des Steigbügels hat eine eigenthümliche Form.

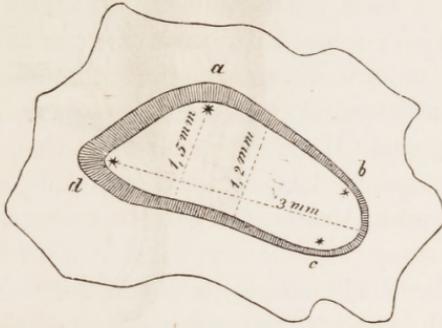


Fig. 15. Nach EYSELL: rechte Basis Stapedis in situ vom Vestibulum gesehen. *ab* obere, *bc* hintere, *cd* untere, *da* vordere Seite des Tritts.

EYSELL's Figur planimetrisch ausgemessen und nach den gegebenen Maassen reducirt, giebt als Fläche der Platte 2,65 □ mm., der Fenestra 3,8 □ mm., also der Annularmembran 1,15 □ mm.

Die Stempelbewegung der Platte wird $\frac{2}{3}$ der Bewegung im Umbo betragen müssen, doch findet sie eine Grenze in der Unnachgiebigkeit der Annularmembran. HELMHOLTZ hat theils direct durch, in die Membran eingepflanzte, als Fühlhebel dienende Nadeln, theils indirect, durch eine, in einen Halbeirkelkanal eingekittete, mit Wasser gefüllte Röhre, das Verschiebungsmaximum bestimmt und dasselbe zu 0,056 bis 0,073 mm. gefunden, eine Zahl, die anderweit⁽⁸⁾ bestätigt wurde. HENKE⁽⁵⁰⁾ hat darauf aufmerksam gemacht, dass bei der Drehung des Hammers der lange Ambosfortsatz gehoben, somit die Steigbügelplatte etwa in der 3 mm. Axe Fig. 15 gedreht, und mit dem Rande *ab* in das Labyrinth hineingepresst werde. Obgleich die Drehpunkte, von welchen dabei ausgegangen wurde, nicht ganz richtig genommen sein dürften, ist die Thatsache einer, die Stempelbewegung begleitenden, kleinen Drehung der Platte richtig und mehrfach bestätigt^(42. 8).

2. Die Functionen des Trommelfells und der Gehörknöchelchen.

Es ist die mechanische Aufgabe des Apparats, die Bewegung der, das Trommelfell treffenden Luftmoleküle, welcher grosse Amplitude aber geringe Kraft beizumessen ist, umzuwandeln in eine Bewegung von geringer Amplitude aber grosser Kraft, und diese Bewegung möglichst vollständig an die Labyrinthflüssigkeit abzugeben. Wir haben zu verfolgen wie diese Aufgabe erfüllt wird.

Ebene Membranen werden wegen ihrer, im Verhältniss zur Masse grossen Fläche, durch Stösse, welche sie auf der ganzen Oberfläche einer Seite treffen, leicht in Bewegung gesetzt, jedoch nur so lange

ihre Trägheit allein das der Bewegung widerstrebende Moment abgiebt. Kommen Bewegungshindernisse anderer Art hinzu, z. B. Befestigung der Membran, Anspannung oder Belastung derselben, so machen sich diese Einflüsse sehr kräftig in Bezug auf die resultirende Bewegung geltend. SAVART⁵¹ fand bei Versuchen mit Membranen von mehreren Decimetern Grösse, dass sie für verschiedene Töne sehr leicht mitschwingen, und dass sich dabei, je nach der Tonhöhe derselben, Knotenpunkte und -Linien mannichfaltiger Art bilden. Bei kreisrunden Membranen finden sich als Knotenstellen Radien und Kreise. HELMHOLTZ^(6. S. 70) giebt als Beispiel für die 5 niedrigsten Eigentöne einer solchen Membran folgende Verhältnisse für den Grundton = 1 an.

Grundton	1. Kreis	2. Kreis	1. Durchmesser	1. Durchmesser u.	1. Kreis	2. Durchmesser
1	2,29	3,599	1,59	2,92		2,14

Die Obertöne einer tönenden Membran sind also unharmonisch. Die Eigenschaft in verschiedene schwingende Abtheilungen sich zerlegen zu können, hat zur Folge, dass eine, aus einer Reihe harmonischer Theiltöne bestehende, Bewegung, von der Membran nicht so wird wiederholt werden können, wie die Luft sie ihr bringt. Es wird die Amplitude des einzelnen Theiltons (und überhaupt der Töne der Skala) um so mehr verringert wiedergegeben, je weiter sich seine Schwingungszahl von derjenigen des nächststehenden Theiltons der Membran entfernt, und dieser Abstand muss, weil die Theiltöne der Membran unharmonisch sind, für die verschiedenen harmonischen Töne der die Schwingung erregenden Bewegung sehr ungleich ausfallen (SEEBECK⁵²).

Das Ohr bietet aber die An- und Abschwellung seiner Intensitätsempfindung, welche man nach Obigem erwarten sollte, nicht dar, wovon man sich mit Hülfe eines Fortepiano vergewissern kann. Es entsteht daher die Frage, wie sich diese Erfahrung mit den erwähnten Verhältnissen vereinbart?

A) Mechanik des Mitschwingens.

Zum Verständniss der Sache ist es nöthig auf die Mechanik des Mitschwingens, welche ohnehin für die Functionen des Labyrinths von grosser Wichtigkeit ist, näher einzugehen.

Bei dem Mitschwingen handelt es sich im Allgemeinen um eine

⁵¹ SAVART, MAGENDIE'S Journ. de physiol. exper. et pathol. p. 183. 1824, und gleichlautend Ann. d. chim. et physique p. 1. 1824.

⁵² SEEBECK, DOVE'S Repert. d. Physik. VIII. S. 63. 1849. Akustik. Referat u. theilweise Citat aus Ann. d. Physik. LXII u. LXVIII. S. 289 u. 449. 1844. u. 46.

mehr oder weniger weitgehende Summirung kleiner, von einem in Bewegung befindlichen Körper ausgehender, Stösse, durch einen zweiten Körper, welcher dieselben empfängt. HELMHOLTZ (^(6. S. 61)) giebt als Beispiel den Mechanismus der Kirchenglocken, bei welchen sehr grosse Massen durch kleine, periodisch angebrachte Stösse schliesslich in starke Schwingungen versetzt werden. Um die in einer Axe aufgehängte Masse in Bewegung zu bringen, genügt es, dass jeder neue Anstoss der, vom ersten Stoss mit sehr geringer Geschwindigkeit bewegten, Masse, eine Beschleunigung ertheile. Jeder Anstoss wird so lange die Geschwindigkeit der Glocke vermehren, bis ihre Elongation so gross geworden ist, dass die, zugleich mit der Elongation wachsende, Reibung, in der Zwischenzeit der Stösse die gewonnene Geschwindigkeit vernichtet. Ob längere oder kürzere Pausen beim Ziehen der Glocke eintreten, ist nur insofern von Bedeutung, als der Reibung mehr Zeit bleibt, die gesetzte Bewegung zu vernichten. Dabei ist vorausgesetzt, dass die Periode der Züge sich nach derjenigen der Eigenschwingung der Glocke richte. Geschieht dies nicht, so summiren sich die Züge nur im Verlaufe kürzerer Zeit oder es findet gar keine Summirung mehr statt. Wenn die Züge doppelt (oder $\frac{2}{3}$) mal so rasch erfolgen wie die Schwingungen, hebt die Wirkung des zweiten Zuges sogar diejenige des ersten völlig auf. Der Fall des Auftretens von Pausen interessirt hier weniger, weil Derartiges bei dem continuirlich, aber in wechselnder Richtung wirkenden Andrang der, in Sinusschwingungen befindlichen, Luftmolekel nicht leicht vorkommt.

Die Theorie des Mitschwingens gaben SEEBECK (⁵²) und später MACH⁵³, sowie für den besonderen Fall des Mitschwingens von Stimmgabeln, unter Einwirkung des von einer zweiten Gabel unterbrochenen, einen Eisenkern umkreisenden galvanischen Stroms, HELMHOLTZ (5. Beil. IX).

Wenn feste Körper in widerstehenden Medien, z. B. in Luft, schwingen, so ändern sich die Formeln (1) und (2) (v. S. 5) etwas. Wenn auf einer Membranfläche f die Luft mit dem Druck Df lastet, so wird, wenn sich die Fläche mit der Geschwindigkeit v bewegt, die Luft vor ihr um $\frac{kv}{c}$ verdichtet, hinter ihr um ebensoviel verdünnt. c bedeutet dabei die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls und k die specifice Wärmecorrection. Die Platte wird demnach

53 MACH, Zur Theorie des Gehörorgans. Sitzgsber. d. Wiener Acad. Math.-anat. Classe. Wien 1863.

$$\begin{aligned} \text{von hinten den Druck } & Df \left(1 - \frac{kv}{c} \right) \\ \text{von vorne den Druck } & Df \left(1 + \frac{kv}{c} \right) \\ \hline & = - 2 Df \frac{kv}{c} \end{aligned}$$

erleiden. Der Unterschied ist die, der Bewegung sich entgegengesetzende, Kraft. Bezeichnet man die durch die Masse M der Platte oder Membran dividirte Constante $\frac{2Dfk}{M}$ mit b , so ergibt sich als einfachste Form der Schwingung die Gleichung:

$$y = e^{-bt} a \sin 2 \pi \frac{t}{T} \dots \dots \dots (8)$$

Hier ist e die Basis des natürlichen Logarithmensystems, die Werthe der anderen Bezeichnungen sind dieselben wie früher. Da der Divisor e^{bt} mit der Zeit in geometrischer Progression wächst, wird y rasch sehr klein. Ein in dieser Form schwingender Körper „klingt ab“. Diese Schwingung, mit welcher er abklingt, bezeichnet man als den Eigenton des Körpers. Dieser ist ein wenig verschieden von demjenigen Ton, welchen er ohne Reibung und einmal angeschlagen geben würde und den man als Ton stärkster Resonanz bezeichnet. Die Schwingungszahl des letzteren ist gegeben durch den Ausdruck $\sqrt{\frac{a^2}{m}}$, die des ersteren durch den Ausdruck

$$\frac{1}{m} \sqrt{a^2 m - \frac{1}{4} b^4}$$

wo m die Masse des schwingenden Punktes und a^2 die Elasticitätsconstanten ist. Der Unterschied beider Ausdrücke kann vernachlässigt werden, sobald b klein ist.

Um einen solchen Körper für längere Zeit in Schwingung zu erhalten, bedarf es einer, während dieser Zeit einwirkenden, periodischen Kraft. Werde diese Kraft durch schwingende Luftmoleküle ausgeübt, so wird sie abhängig sein von deren Masse und periodischer Geschwindigkeit. Wir werden daher für dieselbe nach Formel (2) den Ausdruck

$$am \frac{2 \pi}{T'} \cos 2 \pi \frac{t}{T'}$$

bilden können. m bedeutet die Masse des schwingenden Lufttheilchens, T' dessen Schwingungsdauer. Dann wird die Gleichung* für die unter Einwirkung des Anstosses schwingende Masse werden:

* Die Gleichung resultirt aus der Integration der Differentialgleichung

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = - a^2 y - \frac{b^2 dy}{dt} + C \sin 2 \pi \frac{t}{T}$$

wobei ich die von SEEBECK gegebene Form der Auflösung benutzt habe.

$$y = A \sin 2 \pi \left(\frac{t}{T_1} + \vartheta \right) + e^{-bt} B \sin 2 \pi \left(\frac{t}{T} - \vartheta' \right) \dots (9)$$

$$\text{wo } A = \frac{am}{\sqrt{\frac{\pi^2}{T^4 T_1^2} (T^2 - T_1^2) + b^2}}$$

$$\text{und } \tan \vartheta = \pi \frac{(T_1^2 - T^2)}{b T^2 T_1}.$$

T_1 ist die Schwingungsdauer der Luft, T diejenige der Membran, von ϑ hängt die Phasenverschiebung der resultirenden Schwingung ab. Das zweite Glied rechts der Gl. 9 wird wegen des Coëfficienten e^{-bt} rasch verschwindend klein. Bei genügend grossem b wird es nicht einmal die erste Schwingung stark beeinflussen. Wir gehen also auf die Bedeutung dieses Gliedes hier nicht ein. Sobald es verschwunden ist, schwingt die Membran in derselben Periode, wie der anstossende Körper, aber mit veränderter Phase und Amplitude. Letztere wird gross sein wenn $T_1 = T$ ist; dann fällt nämlich in dem für A gegebenen Werth das erste Glied im Nenner fort und es wird $A = \frac{am}{b}$.

Immer wird die Amplitude durch die Dämpfung verkleinert. Aenderungen des Werthes

$$\frac{\pi^2}{T^4 T_1^2} (T^2 - T_1^2)$$

werden für eine Membran, so lange deren Spannung nicht wechselt, nur durch Aenderungen von T_1 , also durch Erhöhung oder Vertiefung des erregenden Tons eintreten können. Wenn b gross ist gegen

$$\frac{\pi^2}{T^4 T_1^2} (T^2 - T_1^2)$$

wird eine Aenderung von T_1 wenig Einfluss auf die Grösse von A haben können. Es bleibt dann zwar die Amplitude immer recht klein, aber sie ist für verschiedene Töne gleicher Stärke nahe gleich gross. Wäre, um ein Beispiel zu geben, die Abstimmung einer Membran sehr hoch $T = \frac{1}{40000}$ ", so würden die Werthe von A für Töne zwischen $\frac{1}{40}$ bis $\frac{1}{200}$ " sich nicht erheblich und zugleich sehr continuirlich ändern. Noch mehr wird dies der Fall sein wenn gleichzeitig die Dämpfung stark ist.⁵⁴

54 VON CHRISTIANI (Verhandl. d. physiol. Gesellsch. in Berlin, 18. April 1879) ist kürzlich die Theorie des Mitschwingens von Neuem der mathematischen Analyse unterworfen worden, und zwar besonders für den Fall, dass die Dämpfung gross genug sei, um die Bewegung, ähnlich wie bei den gedämpften und astatisirten Magneten (DE BOIS-REYMOND'S), grade aperiodisch zu machen. Er findet, dass für diesen Fall der Resonanzbereich $5\frac{1}{4}$ Octaven beträgt, wenn ein Zehntel der Maximalresonanz als obere und untere Grenze des Mitschwingens gilt. Dies für das Trommelfell ohne Accommodation angenommen, würde der Resonanzbereich $5\frac{1}{4}$ Octaven betragen, aber von der Mitte dieses Bereichs aus würde die Intensität des Mitschwingens nach oben und unten gleichmässig und allmählich bis auf $\frac{1}{10}$ heruntergehen, wenn das Trommelfell grade bis zur Aperiodicität gedämpft wäre. Die Arbeit konnte für den Text nicht mehr benutzt werden.

B) Anwendung der Theorie des Mitschwingens auf das Trommelfell.

Das Trommelfell ist den, über das Mitschwingen der Membranen gegebenen Regeln, unterworfen. Man kann sich also vorstellen, dass bei einer etwaigen phylogenetischen Entwicklung zur Wahl gestellt war, ob eine grosse Empfindlichkeit für einige Töne, neben grosser Unempfindlichkeit für andere benachbarte, für das Ohr zur Verwendung kommen könne, oder ob grosse Gleichmässigkeit, aber zugleich Unempfindlichkeit, des schallübertragenden Apparates vorzuziehen sei. Es würde ja denkbar sein, dass im Labyrinth oder Gehirn Einrichtungen geschaffen wären, welche die Ungleichmässigkeit der Uebertragung mittelst abgestimmter Membranen, durch Erhöhung und Verminderung der Empfindlichkeit der Endapparate, bis zu der thatsächlich vorhandenen Gleichmässigkeit der Intensitätsempfindung compensirten. Dann aber würde eine kleine Verstimmung des Trommelfells den ganzen Mechanismus aufs stärkste gefährden. Die Erfahrungen der Pathologen über Krankheiten des Trommelfells, und Versuche SCHMIDKAM's (8) über das Hören, während das Trommelfell durch Berührung mit einer Sonde verstimmt war, lassen nicht erkennen, dass die eintretenden Störungen der Art sind, wie es letztere Annahme erfordert.

Ausserdem würde dabei durch Summirung der Stösse eine Eigenschwingung des Trommelfells eintreten können. Diese würde stattfinden, wenn die mittlere Amplitude der Membran, multiplicirt mit ihrer Masse, grösser würde, als die Amplitude der vor dem Trommelfell schwingenden Luftmolekel, multiplicirt mit deren Masse. In solchem Falle würden wir fast nur den, der Abstimmung der Membran entsprechenden Klang vernehmen, die Membran würde selbsttönend werden, was für die objectiven Wahrnehmungen sehr hinderlich sein müsste, und nicht beobachtet wird.*

Es ist also eine grössere Gleichmässigkeit mit grösserer Unempfindlichkeit des Apparates für den Menschen gewählt worden. Die dafür zu stellenden Anforderungen können in zwei Weisen befriedigt werden, nämlich durch sehr hohe Abstimmung, oder durch starke Dämpfung. Die erstere Weise, an die SAVART (51) gedacht hat, würde eine so hohe Abstimmung des Trommelfells erfordern, dass der entsprechende Ton ganz, oder beinahe, ausserhalb der für uns wahrnehmbaren Töne liegen müsste. Dann würde aber der Werth der Amplitude (A Formel 9) wegen des grossen Einflusses der Membranabstimmung T im Nenner, ein sehr geringer werden. Nach den Verhältnissen des Trommelfells kann eine hohe Abstimmung über-

* Bei ungedämpften Membranen hört man sehr leicht den Eigenton mitklingen.

haupt nicht angenommen werden. Je kleiner nämlich die Flächen-
ausdehnung, je dicker und unnachgiebiger die Substanz und je grösser
die Spannung einer Membran ist, desto höher wird ihr Eigenton sein.

Unser Trommelfell hat eine im Verhältniss zur Dicke nicht kleine
Fläche, es ist zwar unnachgiebig, aber dafür ist seine Spannung eine
sehr geringe, so dass kein hoher Eigenton zu erwarten ist. Wir
kennen zwar seine Abstimmung noch nicht, aber die genannten Eigen-
schaften des Tympanum lassen sich genau nachweisen.

Als GRUBER⁵⁵ die Spannung des Trommelfells untersuchte, fand
er, dass das hintere Segment, namentlich im oberen Quadranten,
besonders nachgiebig ist, dass kleine Einschnitte in die Membran
nicht klaffen, und dass man den Hammer ganz aus dem Trommelfell
lösen könne, ohne dass dieses seine Gestalt ändere. Diese That-
sachen lassen sich leicht bestätigen und möchte ich hinzufügen, dass
der abgetrennte, dem Trommelfell wieder angelegte Hammerstiel sich
diesem vollständig anfügt; ferner dass, sobald man am intacten Trom-
melfell den Hammer auch nur ein Minimum lateralwärts drückt, feine
Radiärfalten, bei stärkerem Druck gröbere Circulärfalten entstehen;
sobald aber Falten auftreten, ist schon die Stellung, in welcher die
Membran gespannt ist, überschritten.

Demnach wirkt auf das Trommelfell kein äusserer Zug, son-
dern dasselbe wird in seiner Stellung lediglich durch seine Steifig-
keit erhalten. Ein Goldschlägerhäutchen, auf einen Rahmen gespannt,
benetzt und wieder getrocknet, hat eine durch aufgestreuten Sand leicht
erkennbare Abstimmung. Dasselbe Häutchen, wieder befeuchtet und
mit Hilfe eines Conus ähnlich gewölbt wie das Trommelfell, behält
getrocknet, vermöge seiner Steifigkeit, diese Form. Prüft man es jetzt
auf seine Abstimmung, so findet sich, dass dieselbe über zwei Octaven
tiefer liegt wie im vorigen Fall. Es wird der Schluss erlaubt sein,
dass auch das Trommelfell vermöge seiner trichterförmigen Gestalt eine
relativ tiefe Abstimmung habe. *) Vielleicht erzeugt man seinen Eigen-
ton, wenn man Luft in den Gehörgang fächelt. Der dabei auftretende
Ton ist nicht genau zu bestimmen, aber kann gewiss nicht höher
sein als 700 Schwingungen. SAVART'S Ansicht entspricht demnach
nicht den wirklich vorkommenden Verhältnissen; ja es kann zweifel-

55 GRUBER, Ueber d. normalen Spannungsverhältnisse d. menschl. Trommelfells.
Monatschr. f. Ohrenheilkunde. No. 5. 1877.

* Der Resonanzton ist nach früherem $\sqrt{\frac{a^2}{m}}$, wenn, wie beim Trommelfell, die
äussere Spannung wegfällt, hängt a^2 nur noch von der Steifigkeit der Membran ab
ist also relativ zu m viel kleiner, als wenn noch die äussere Spannung bei den Schwing-
ungen stark mitwirkte. Die Schwingungszahl des Resonanztons wird daher gering
sein müssen.

haft sein, ob einer so unsymmetrischen Membran überhaupt eine präcise Abstimmung zukomme.

Eine starke, durch die Knöchelchen und das Labyrinthwasser bewirkte Dämpfung, bezeichnete SEEBECK⁽⁵²⁾ und nach ihm MACH⁽⁵³⁾ als die Ursache der Gleichmässigkeit unserer Tonwahrnehmung. In Folge solcher Dämpfung wird also die Amplitude der Schwingungen sehr verringert, aber es wird die Wirksamkeit einer Abstimmung der Membran in dem Maasse zurücktreten, wie die Dämpfung überwiegt. Je niedriger der Eigenton der Membran ist, desto geringer braucht die Dämpfung zu sein, um den Einfluss der Abstimmung zu eliminiren und die Bewegung, nachdem der Membran ein einzelner Stoss ertheilt ist, ähnlich wie bei einem gedämpften Magneten, aperiodisch zu machen.

Bei den etwas eigenthümlichen Verhältnissen des Schalleitungsapparates lassen sich die Bedingungen noch nicht so übersehen, dass eine genauere Ausbildung der von SEEBECK gegebenen Darlegung, namentlich was den Einfluss der etwa vorhandenen Theiltöne des Trommelfells betrifft, zu geben wäre. Der Einfluss der ungleichmässigen Nachgiebigkeit, der ovalen Gestalt und geneigten Lage des Trommelfells, sowie der unsymmetrischen Insertion des Hammerstiels, ist noch nicht geprüft. Diese Verhältnisse finden sich übrigens nach MOLDENHAUER⁵⁵ ähnlich bei Reptilien und Vögeln, und sind bei vielen Säugethieren mindestens so auffallend wie beim Menschen, dürften also nicht unwichtige sein.

Ueber den mechanischen Effect der Convexität der Trommelfell-Meridiane und über denjenigen der trichterförmigen Einziehung (die bei Vögeln zu einer Vorwölbung umgestaltet ist) hat HELMHOLTZ⁽³²⁾ Aufschlüsse gegeben. Er weist nach, dass eine relativ beträchtliche Verschiebung der Fläche des Trommelfells in Richtung des auf sie wirkenden Luftdrucks, eine verhältnissmässig kleine Verschiebung der Hammer Spitze bedingt. Daraus folgt nach dem allgemeinen mechanischen Gesetz der virtuellen Geschwindigkeit, dass schon ein verhältnissmässig geringer Werth des Luftdrucks einer verhältnissmässig grossen, am Hammergriff angebrachten Kraft, das Gleichgewicht halten, beziehentlich eine solche ersetzen wird.

Betrachtet man eine einzelne Radiärfaser des Trommelfells, deren

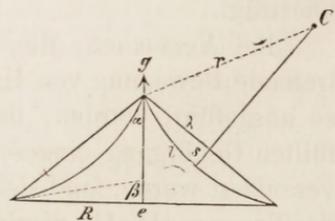


Fig. 16. Schematischer Durchschnitt des Trommelfells nebst Construction zur Erläuterung des Nachfolgenden.

56 MOLDENHAUER, vergleichende Histologie d. Trommelfells. TRÖLTSCHE'S Arch. XIII. S. 113. 1878.

relative Unausdehnbarkeit angenommen wird, und nennt dieselbe l (Fig. 16); nennt man ferner die dazu gehörende Sehne λ und den Abstand der Mitte des Bogens von der Mitte der Sehne s , so wird die Gleichung

$$l - \lambda = \frac{8}{3} \frac{s^2}{l}$$

Geltung haben.

$l - \lambda$ ist die Grösse, um welche die beiden Enden des Bogens sich einander nähern, wenn letzterer sich stärker wölbt; es ist also auch die Bewegung, welche der Hammerstiel dabei machen würde, wenn er allein unter Wirkung der betreffenden Faser stände. s ist die Verschiebung der Mitte der Faser. Wenn nun s verschwindend klein ist im Vergleich mit l , so ist die Grösse $l - \lambda$ eine unendlich kleine Grösse zweiter Ordnung, verglichen mit s ; letzteres wird sich also stark verändern müssen, wenn die Faserenden sich um etwas nähern und entfernen sollen.

Die Kraftverhältnisse findet HELMHOLTZ aus folgender Betrachtung. Wenn man sich die überall gleichgekrümmte Faser l bis zum Halbkreis mit dem Radius r verlängert denkt und sie für jede Längeneinheit mit dem Druck p belastet, dann müssen die, die beiden Enden der Faser spannenden Kräfte, welche wir mit $2t$ bezeichnen, dem Druck das Gleichgewicht halten, der auf den ganzen Durchmesser des Halbkreises in gleicher Breite wie sie die Faser hat, ausgeübt wird, d. h. der Grösse $2rp$. Daraus folgt:

$$2t = 2rp, \text{ oder } t = rp.$$

Je grösser also r ist, desto grösser wird die, durch Aenderung des Luftdrucks auf die Faser bewirkte, Spannungsänderung derselben sein; diese aber ist es, welche die Schallerschütterungen auf den Hammer überträgt.

Bei Versuchen, die, in Folge einer Luftdruckschwankung auftretende Bewegung von Hammer und Trommelfell zu messen, welche so ausgeführt wurden, dass ein Manometer in den mit Wasser gefüllten Gehörgang eingesetzt, und vom Steigbügel aus die Bewegung veranlasst wurde, fand sich, dem Obigen entsprechend, dass die Fläche des Trommelfells wenigstens dreimal so starke Excursionen machte, als der Hammergriff, welcher sie in Bewegung setzte.

Die Wirkung aller Fasern des Trommelfells auf den Hammer ist von HELMHOLTZ zunächst nur für eine regelmässig geformte Membran abgeleitet. Eine solche sei kreisrund, in der Mitte kegelförmig eingezogen und ringsum symmetrisch gestaltet, bilde also eine Rotationsfläche, deren Durchschnitt in der Fig. 16 gegeben sei. Ist eg die Axe, R der Radius des Randkreises, ferner α der Winkel, den

die in der Ebene der Zeichnung gezogene Tangente an der Spitze der Membran mit der Axe macht und β der Winkel, den die entsprechende Tangente eines Randpunktes der Membran mit der Axe macht, ist endlich p der Luftdruck, so findet sich die Kraft k , welche an dem Centrum der Membran angebracht werden muss um dem Luftdruck das Gleichgewicht zu halten, aus der Formel

$$k = \frac{p \pi R^2 \cos \alpha}{\cos \alpha - \cos \beta}.$$

Je kleiner also der Unterschied zwischen α und β , d. h. je flacher gespannt die Membran ist, desto grösser wird die Kraft k . Aber die Kraft wächst auch, und zwar wie $\cos \alpha$, wenn die Winkel α und β bei gleichbleibender Differenz $\cos \alpha - \cos \beta$ kleiner werden, d. h. wenn die Spitze der Membran stärker eingezogen wird.

Um die akustische Wirkung solcher Membranen zu prüfen, construirte HELMHOLTZ den Apparat Fig. 17.

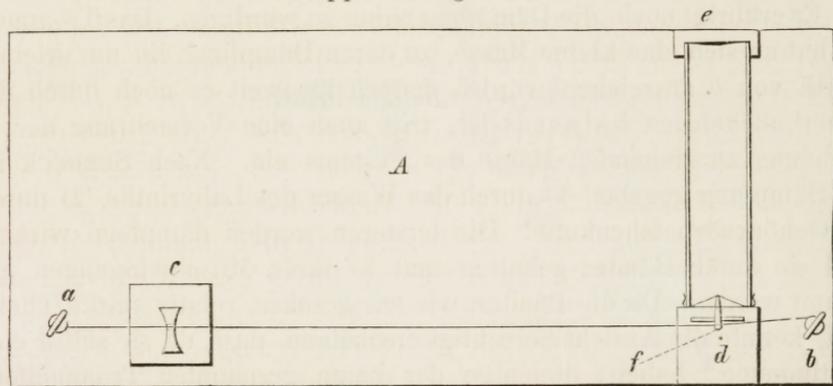


Fig. 17. Die dem Trommelfell ähnlich geformte Membran sitzt auf dem Cylinder e , vor demselben ist eine Saite ab ausgespannt, welche bei c behufs der Verkürzung des Stückes bc über einen Steg läuft, der auf einem Bleiklotz steht; letzteres um die Tonübertragung auf das Grundbrett A zu verhindern. Bei f ist ein Stäbchen zwischen Saite und Membran gestellt, welches durch einen Steg auf dem Bleiklotz d getragen wird und welches die Verbindung zwischen Membran und Saite herstellt.

Die Versuche ergaben, dass wirklich durch diese Verbindung der Ton der Saite sehr kräftig an die Luft übertragen wird, namentlich bei hohen Tönen (der viergestrichenen Octave). Umgekehrt überträgt sich leicht eine Tonbewegung in der Luft an die Saite, am besten wenn der Eigenton der Saite mit dem Eigenton der Röhre gleich ist; aber auch sonst kommen auf die Saite gesetzte Reiter von Papier leicht in Bewegung.

Die trichterförmige Gestalt des Trommelfells giebt zur Entstehung von Combinationstönen und Theiltönen im Leitungsapparat und Labyrinth Anlass. Es ist nachgewiesen, vgl. S. 15, dass man unter Umständen diese Töne hört, wo kein Hilfsmittel deren objektives Auftreten im Luftraum nachweisen lässt. Der Grund für die Umwand-

lung einfacher Tonbewegungen in diese complicirteren Formen liegt in Folgendem. Die Combinationstöne treten, auf wenn die Kraft k nicht mehr die Form hat:

$$k = ay$$

sondern

$$k = ay + by^2.$$

Letztere Gleichung fordert, dass für $-y$, d. h. bei der negativen Phase der Bewegung, die Kraft k nicht nur ihr Vorzeichen, sondern auch ihren absoluten Werth ändere; denn statt y $-y$ gesetzt, haben wir

$$k = -ay + by^2.$$

Bei stärkeren Excursionen muss sich das Trommelfell spannen wenn es nach einwärts geht, wirft dagegen Falten, wenn es die Ruhelage nach aussen zu merklich überschreitet. Dies Verhalten entspricht also den Bedingungen der 2. Gleichung und es führt insofern mit mathematischer Nothwendigkeit zum Auftreten der bei der Besprechung der Combinationstöne S. 15 gegebenen Tonreihe.⁵⁷

Es erübrigt noch, die Dämpfung näher zu würdigen. Das Trommelfell hat an sich eine kleine Masse, zu deren Dämpfung ein nur kleiner Werth von b ausreichen würde. Jedoch insoweit es noch durch die Gehörknöchelchen belastet ist, tritt auch eine Vermehrung der in Rechnung zu ziehenden Masse des Systems ein. Nach SEEBECK ist die Dämpfung gegeben 1) durch das Wasser des Labyrinths, 2) durch die Gehörknöchelchenkette. Die letzteren werden dämpfend wirken, weil sie durch Bänder gehalten und in ihren Mitschwingungen gehemmt werden. Da die Bänder, wie wir gesehen, relativ starke Theile sind, könnte die Ansicht berechtigt erscheinen, dass, da sie selbst eine Abstimmung* haben, diejenige des kaum gespannten Trommelfells dem gegenüber zurücktreten würde. Diese Abstimmung würde wegen der Kürze und Dicke der Bänder vielleicht sogar die, von SAVART für den Leitungsapparat verlangte Höhe, haben können. * Um die Verhältnisse zu prüfen, wurde von mir an eine trichterförmige Membran ein Metallstreifen als Hammer befestigt, und die Axe desselben durch kurze, kräftig zu spannende Eisendrähte hergestellt, s. Fig. 18. Die Abstimmung dieser Drähte ist eine sehr hohe, aber es lässt sich nicht nachweisen, dass die Wiedergabe hoher Töne bei dieser Einrichtung besonders begünstigt sei. Der Apparat wirkt aber sowohl als Logograph wie als Phonograph recht gut, was nur der Dämpfung zu verdanken ist. Immerhin hätte diese noch etwas stärker sein

57 J. J. MÜLLER, Ueb. d. Tonempfindung. Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss. XIII. S. 115 hat eingehende Untersuchungen über die Veränderungen, welche ein Klang in Folge dieser Verhältnisse erleidet, gemacht, es handelt sich um sehr kleine Modifikationen hinsichtlich deren auf das Original verwiesen werden muss.

* Weiteres über diese Abstimmung siehe S. 49.

können, denn die Bewegung der angestossenen Membran war noch nicht aperiodisch. Daraus ergibt sich, dass die Fesselung der Gehörknöchelchen, so stark die Bandmassen auch sind, gewiss nicht geringer hätte sein dürfen, dass aber eine scharfe Abstimmung des Apparats durch die Bänder nicht bewirkt wird.

C) Directe Beobachtungen der Schwingungen des Gehörknöchelchenapparats.

Es sind eine Reihe von Beobachtungen über die Schwingungen des Apparates in der menschlichen Paukenhöhle gemacht worden. Bei denselben ist hervorzuheben, dass die

Muskelelasticität
nothwendig gegen
den normalen Zustand
verändert war, und
dass in der Regel die
Tonwellen wegen Er-
öffnung des Cavum
tympani, das Trom-
melfell auch von der
inneren Seite, wenn
gleich mit verminder-
ter Kraft, trafen. Die
Beobachtungen wur-
den mittelst Zuleitung
des, stets sehr kräfti-
gen Tons in den äus-
seren Gehörgang, an-
gestellt, indem man
entweder Röhren oder

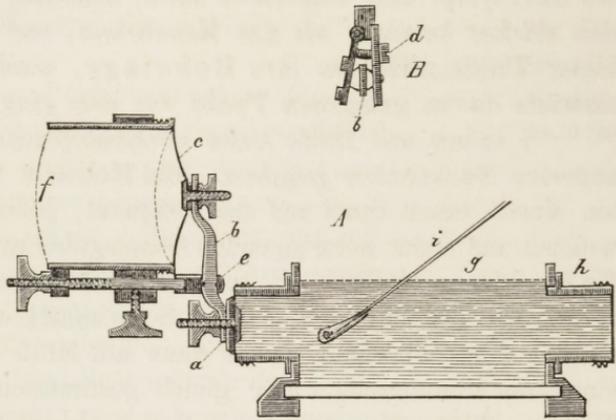


Fig. 18. *A* Tonzuleitungsapparat für Untersuchungen der Schwingungen im Wasser, derselbe Apparat dient, je nachdem man die Spitze *a* des Hammers *b* mit einer spitzen Feder oder mit einem festen Stift armirt, als Logograph oder als Phonograph. *c* das Trommelfell, *e* die Axe des Hammers, aus zwei Drähten bestehend, die den als Hammer dienenden Metallhebel umspannt halten. Ein Durchschnitt des Gelenks ist bei *B* gegeben, man sieht wie die den Hammer darstellende Metallplatte *b* von zwei Drähten umfasst wird, welche durch die Schraube *d* gespannt werden. Von dem Rohr *f* aus wird der Ton zugeleitet. *g* ist ein mit Wasser gefüllter Kasten, dessen Boden durch eine Glasplatte geschlossen wird. *h* ein mit einer Membran überzogener Tubulus zur Ableitung der Schallbewegung aus dem Wasser. *i* eine Nadel, auf welche das zu untersuchende Object befestigt wird. Die Nadel wird jedoch durch einen, hier nicht sichtbaren Tubulus von der Seite her mit Hilfe eines Korks in den Raum eingeführt. Die verschiedenen Schrauben dienen zur genauen Einstellung und Befestigung der Theile.

Resonatoren in ihn fest einfügte.

Die ersten Versuche hat POLITZER ^(29. S. 59) gemacht, welchem es glückte, durch, auf Hammer und Ambos geklebte Fäden, recht deutliche Curven auf einen berussten rotirenden Cylinder schreiben zu lassen. Einfache Töne, Schwebungen und etwas zusammengesetzte Schwingungen wurden so gezeichnet. Aehnliche Erfolge hatte auch BLAKE ⁵⁸, der das Trommelfell zur Benutzung als Logograph empfiehlt. BUCK ⁵⁹ hat die Schwingungen an den Schwingungslinien, welche

⁵⁸ CLARENCE BLAKE, Ueb. d. Verwerthung d. Membr. tymp. als Phonoautograph und Logograph. Arch. f. Augen- u. Ohrenheilkunde. V. S. 434. 1876. Interessant ist, dass der Erfinder d. Telephons, GRAHAM BELL, sich bei den Versuchen betheiligte.

⁵⁹ BUCK, Ueb. d. Mechanism. d. Gehörknöchelchen. II. Ebenda 1870.

durch glänzende Punkte an den Knöchelchen entstehen, mikroskopirt. Die Excursionsweite des Hammerkopfs ging bis 0,43 mm. Ein doch recht beachtenswerther Befund ist, dass bei kleineren Schwingungen oft dieselbe Amplitude an Hammerkopf und Steigbügel gefunden wurde; andere Male dagegen nur $\frac{1}{9}$ derselben. Die Bewegungsrichtungen entsprechen nicht besonders gut den von HELMHOLTZ gelehrten Ansichten, jedoch erklärt BUCK diese in den Einzelheiten nur bestätigen zu können, was uns genügen kann. HENSEN (s. S. 100), der schon vor BUCK in dieser Weise und zwar von der unteren Wand des Cav. tymp. aus, untersucht hatte, bemerkt, dass das Trommelfell sich stärker bewegte als das Manubrium, und dass die Schwingung dieser Theile nicht um ihre Ruhelage, sondern um einen etwas einwärts davon gelegenen Punkt vor sich ging. MACH und KESSEL (60, 61, 62) haben mit Hilfe eines stroboscopischen Verfahrens die genauesten Nachrichten gegeben. Ein Heliostat warf die Sonnenstrahlen durch einen Spalt auf das Präparat, jedoch ein zweiter Spalt, welcher auf einer schwingenden Stimmgabel angebracht war, schnitt die Strahlen periodisch ab, so dass das Präparat nur kurze Zeit und so oft wie die Stimmgabel eine Schwingung vollendete, beleuchtet wurde; dem Gehörgang wurde dann mit Hilfe eines Schlauches, von einer, der Stimmgabel nahe gleich gestimmten Orgelpfeife aus, der Ton zugeführt. Man sah daher den beobachteten Punkt alle Phasen seiner Schwingung allmählich durchlaufen. Auch an dem Trommelfell des lebenden Menschen konnten auf diese Weise die Schwingungen beobachtet werden. Dies geschah mit umstehendem Apparat Fig. 19.

Da die am Lebenden gemachten Beobachtungen zu keinem anderen Resultat führten, als diejenigen am Präparat, genügt es, über die letzteren zu berichten. Bei Ankunft der Verdichtungsphase flacht sich das Trommelfell, vom Umbo her beginnend, ab und wird sogar schwach concav. Diese Bewegung soll bei den längeren hinteren Fasern des Trommelfells länger fortdauern, wie bei den vorderen. Der Hammerstiel geht von vorn aussen, nach hinten innen, und dreht sich so, dass die Spitze des Proc. obtusus von oben nach unten und hinten geführt wird. Dabei werden am Kopf die medialen oberen Gelenkränder von einander entfernt, die Gelenkkapsel wölbt sich an dieser Stelle vor, während sie auf der entgegengesetz-

60 KESSEL, Ueb. d. Einfluss d. Binnenmuskeln d. Paukenhöhle. TRÖLTSCHE'S Arch. IX. S. 80. 1874.

61 MACH u. KESSEL, Beiträge z. Topographie u. Mechanik d. Mittelohrs. Sitzgsber. d. Wiener Acad. III. Wien 1844.

62 Dieselben, Versuche üb. Accommodation d. Ohrs. Ebenda 1872 u. TRÖLTSCHE'S Arch. IX. S. 121.

ten Seite in Folge von Verschiebung des Meniscus und der Synovia einsinkt. Der Hammer schleift etwas auf dem Ambos, in der negativen Phase geschieht letzteres jedoch in viel höherem Grade. Die Spitze des kurzen Ambosfortsatzes macht einfache Rotationsbewegungen.

Das Ossiculum Sylvii schleift auf dem Steigbügel; es bewegt sich nach innen und zugleich nach vorn und oben. Der ganze Fusstritt des Steigbügels wird labyrinthwärts gedrängt, am ausgiebigsten an dem vorderen Theil, dann auch am oberen Rande, zuweilen ist seine Bewegung schraubenförmig.

Für manche Fragen entscheidend ist die Beobachtung, dass die Membran des runden Fensters nach aussen geht, wenn der Steigbügel sich nach innen bewegt.

Die Bewegungen waren z. B. in einem Falle bei Druckschwankungen von $\pm 0,0053$ Atmosphären und 256 Schwingungen am Umbo 0,5, Hammerkopf 0,32, Steigbügelköpfchen 0,06 mm.

WEBER LIEL⁶³ hat bei Beobachtung der Steigbügelplatte vom Labyrinth aus bei geschlossener Paukenhöhle gefunden, dass die Circularmembran schon bei leisen Tönen deutlich schwingt, während die Fussplatte selbst noch keine Bewegung erkennen liess. Auffallender Weise ist grade ein solches Verhalten von RIEMANN⁶⁴ als ein, den Klang sehr entstellendes, aufgefasst worden.

Bezüglich einer Abstimmung der Theile des Leitungsapparates hat MACH⁽⁵³⁾ durch Rechnung erwiesen, dass für die einzelnen Theile: Trommelfell, Hammer, Ambos, Steigbügel, Labyrinthwasser, ja vielleicht für die einzelnen Axen ihrer Bewegung, besondere Abstimmungen anzunehmen seien, deren Einfluss auf die Schwingungen von dem Grade ihrer Dämpfung abhängt. In der That fand HENSEN^(s. S. 8.), dass bei der directen Zuleitung des Tons einer Sirene in sein Ohr, bei dem Durchlaufen der Tonreihe eine Anzahl stark markirter Schwellungen eintrat, für die eine äussere Ursache nicht zu finden war. Die zu starken Töne wirkten jedoch

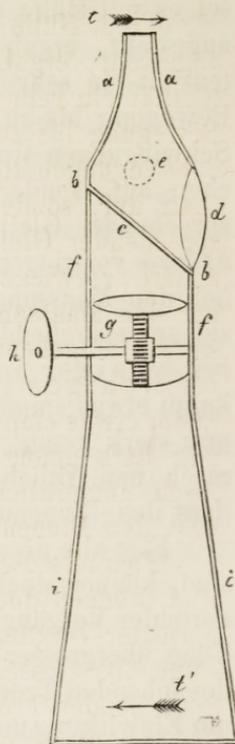


Fig. 19. Der in den Gehörgang des gut fixirten Kopfes eingeführte Trichter *aa* warf mit Hülfe der Linse *d* und des bei *c* durchsichtigen Spiegels *bb* Sonnenlicht auf das Trommelfell, während durch die Oeffnung *e* der Ton zugeleitet wurde. Die Linse *g* entwarf ein Bild des mit Goldbronce bestäubten Trommelfells bei *f* und dieses wurde microscopisch beobachtet.
h Trieb.

63 WEBER LIEL, Membr. tympan. secund. Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. No. 1, 4, 5. 1876.

64 RIEMANN, Mechanik d. Ohrs. Ztschr. f. rat. Med. XXIX. S. 129.

verletzend auf das Ohr, so dass die Versuche nicht genügend wiederholt werden konnten. Die directe Beobachtung der Knöchelchen, sei es mit Hilfe des Microscops, sei es mit aufgeklebten Fühlhebeln angestellt, ergab für Töne verschiedener Höhe, aber ähnlicher Intensität ein sehr verschiedenes Mitschwingen, von kaum merklicher Bewegung bis zu überraschend starken Elongationen. Die stärkeren Schwingungen traten keineswegs gleichzeitig in allen drei Knöchelchen auf, sondern es beteiligten sich daran, natürlich unter entsprechender Gleitung in den Gelenken, jeweilig das eine oder das andere vorwiegend. Diese Verschiedenheit des Mitschwingens ist bei den Maassangaben aller Beobachter nachzuweisen, doch wurde sie am eingehendsten von SCHMIDKAM (8) verfolgt. Da unser Ohr bei weniger intensiven Tönen von dieser Ungleichmässigkeit kaum etwas empfindet, würde man schliessen können, dass die Dämpfung stark genug sei, um Eigenschwingungen geringer Amplitude rasch unmerklich zu machen, aber es bleibt die Möglichkeit offen, dass den Binnenmuskeln des Ohrs dabei eine Rolle zufalle.

Fast alle diese Beobachtungen, so mühevoll und dankenswerth sie sind, können doch nur als erste Annäherungen an die Beobachtung normaler Vorgänge bezeichnet werden, denn stets handelt es sich um Töne übergrosser Intensität, um todte Theile oder ungünstige Lage des lebenden Trommelfells, um geöffnete Paukenhöhle oder Labyrinth, um Einwirkung ungewöhnlicher Resonanzverhältnisse und zuweilen um Belastung der Theile mit Fühlhebeln, welche eigene Abstimmung haben. Im Ganzen stehen die Resultate der physiologischen Untersuchung im Einklang mit den physikalischen und anatomischen Voraussagen.

D) Molekular- und Massen-Schwingungen.

Lange Zeit hat eine Differenz der Ansichten bestanden, welche dahin ging, dass die Einen, nach dem Vorgang von EDUARD WEBER⁶⁵ annahmen, die eigentliche Uebertragung des Schalls geschähe durch Massenschwingung des ganzen Leitungsapparates, die Anderen aber, namentlich JOH. MÜLLER⁽¹³⁾ und mit ihm die meisten vergleichenden Anatomen, denen die im Wasser lebenden Thiere so nahe liegen, gegen diese Annahme Bedenken hatten und glaubten, es müssten Molekularschwingungen (Longitudinalschwingungen) die Rolle der Schallübertragung übernehmen.

Es ist richtig, dass die entstehende Bewegung, wenn der Zug der schwingenden Trommelfellfasern die Moleküle des Hammers trifft, sich im Hammer nach allen Richtungen fortpflanzen muss. Es wer-

65) ED. WEBER, Ueb. d. Zwecke d. Fenestr. rot. Ber. üb. d. 19. Versamml. dtshr. Naturf. S. 83. 1841 u. Ber. d. sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Klasse. 1851.

den dann die freistehenden Theile, ähnlich wie dies am Stiel einer Stimmgabel microscopisch zu beobachten ist, normal gegen die Oberfläche stossen, es werden also Molekularschwingungen auftreten. Dass diese sich bei den Gehörknöchelchen wirklich finden, scheinen Beobachtungen SCHMIDKAM's (8) zu erweisen, denen zufolge aufgeklebte Fühlhebel nach Tonhöhe die Richtung ihrer Schwingungen verändern. Es ist aber zu bedenken, dass von allen diesen Bewegungen nur diejenigen zur Verwerthung kommen, welche sich nach dem Labyrinth hin fortpflanzen. Die Berechnung eines speciellen Falls zeigt vielleicht am deutlichsten, dass in genannter Richtung Massenbewegung erfolgen muss. Nehmen wir die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Knochen zu 2000 Metern (in Stahl ist sie e. 5000 M.) und ziehen den für die Wahrnehmung schon zu hohen Ton von 40000 Schwingungen in Rechnung, so ergibt sich dessen Wellenlänge im Knochen zu 50 mm. Die Dicke des Hammerstiels zu 1 mm. genommen, berechnet sich, dass von dem Moment an, wo der Stoss die laterale Fläche desselben trifft bis zu dem, wo er an seiner medialen ankommt, der 50. Theil einer Schwingung abgelaufen sein wird. Während 24 solcher Zeittheilchen wirkt auf alle Moleküle des Hammers der Druck, im 25. auf einen Theil derselben Zug, auf den anderen Druck dann in 24 Zeittheilen auf alle Zug. Weil also alle Moleküle fast stets in gleicher Richtung gedrängt werden, wird sich die ganze Masse des Hammers und ebenso die der anderen Knöchelchen in die gleiche Bewegung setzen müssen. Da dies schon für die Töne kürzester Wellenlänge gilt, sind wir berechtigt im Allgemeinen von den Formveränderungen, welche die Knöchelchen in ihrem Inneren erleiden, abzusehen. RIEMANN (64) fordert zwar wegen der ungemainen Kleinheit noch hörbarer Druckschwankungen, absolute Treue in der Wiedergabe derselben und glaubt, dass schon Temperaturschwankungen in der Pauke die Treue der Massenschwingungen stören könnten; aber einerseits geschieht die Uebertragung doch anders, wie er dieselbe sich scheint vorgestellt zu haben, andererseits wird in der That, wie HELMHOLTZ (32) bemerkt, eine absolute Treue der Wiedergabe sich nicht finden und genügt es, um gute Wahrnehmungen zu erlangen, wenn nur immer dieselben kleinen Störungen unter denselben Bedingungen sich in gleicher Weise wiederholen.

E) Belastung des Trommelfells.

Es sind noch einige Experimente zu erwähnen, welche sich auf Belastung des Trommelfells beziehen. Bei einer tönend schwingendem Membran würde Berührung oder Belastung äusserst störend

wirken, bei immer nur mitschwingenden gedämpften Membran wird dies weniger der Fall sein. In der That fand SCHMIDEKAM⁽⁵⁾, dass Berührung des Trommelfells durch federnde Sonden die Schallwahrnehmung nicht hinderte, während jede Berührung der Sonde sehr stark vernommen wurde. Füllung der Gehörgänge mit Wasser und Untertauchen hat nach WEBER^(65. S. 30) den Verlust des Vermögens, zu unterscheiden von welcher Seite ein Ton komme, zur Folge. (Vermuthlich wegen der grossen Länge der Schallwelle im Wasser und wegen Enge des Bassins.) Nach SCHMIDEKAM tritt ausserdem ein 1. starke osteo-tympanale Leitung; (man möchte glauben, weil die Wassermasse im Gehörorgan den Schall besser aufnimmt und dem Trommelfell zuführt, als sonst die Luft); 2. bedeutende Schwächung der Empfindung der eigenen lauten Sprache, während die eigene Flüstersprache noch gut vernommen wird. Dies erklärt sich vielleicht dadurch, dass durch die Wasserbelastung nicht nur die Spannung, sondern mehr noch die Dämpfung des Trommelfells vermehrt wird. Diese Dämpfung schadet wahrscheinlich der Wahrnehmung von Geräuschen nicht viel, während die Summirung der Bewegung, welche bei regelmässigen Tonschwingungen eintritt, durch die Dämpfung sehr herabgesetzt wird.

3. *Trommelhöhle und Tuba Eustachii.*

Die Paukenhöhle der Säuger ist von sehr wechselnder Gestalt. Bald von überraschender Ausdehnung, bald relativ klein, obgleich nie sehr klein, oft mit glatten Wänden versehen, aber häufiger innen rauh oder mit kleinen und grossen Zellenräumen bekleidet, ja selbst in zwei oder drei fast völlig von einander getrennte Räume getheilt. Vereinzelt communiciren die Pauken beider Ohren. Aus diesen Verhältnissen sind physiologische Schlüsse bisher nicht gezogen, es sei denn der, dass der besonderen Gestalt der Höhle kein grosses Gewicht beizulegen sei.

Die theoretischen Forderungen, welche an diesen Theil zu stellen sind, hat MACH⁶⁶ in klarer Weise entwickelt. Für die Trommelfellschwingungen, sagt er, wird der grösste Nutzeffekt erzielt wenn dasselbe von einer Seite möglichst gegen die Schallwellen geschützt ist. Die Höhle darf nicht zu flach sein, denn bei geringer Tiefe werden schon durch kleine Trommelfellexcursionen bedeutende Expansivkräfte der eingeschlossenen Luft geweckt, dagegen könnte eine grössere Trommelhöhle von regelmässiger (nicht von Zellen durchsetzter) Form wegen der Resonanz nachtheilig werden.

66 MACH u. KESSEL, Die Function d. Trommelhöhle u. Tuba. Sitzgsber. d. Wiener Acad. 3. Abth. 1872.

Die Veränderungen, welche die Luft in der Paukenhöhle erfährt, sind nicht untersucht. Wir dürfen mit LÖWENBERG⁶⁷ dessen sicher sein, sie mit Wasserdampf gesättigt zu finden, auch wird in Folge Wirkung der gefässreichen Oberflächen eine Vermehrung der Kohlensäure und Verminderung des Sauerstoffs eintreten. Es kommt jedoch ferner in Betracht, dass ein osmotischer Strom durch das Trommelfell gehen dürfte, und dass eine periodische Communication mit der Nasenluft durch die Tuba vermittelt wird.

Ueber die Tuba Eustachii haben namentlich die Ohrenärzte sehr eingehende Untersuchungen angestellt, da sie den einzigen practicabeln, und zugleich einen häufig erkrankten, Zugang zur Paukenhöhle bildet.

Die Tuba, hervorgegangen aus dem inneren Theil der ersten Kiemenspalte, ist ein 35 mm. langer Kanal, welcher aus einem 11 mm. langem knöchernen und 24 mm. langen knorpelig-häutigen Theil besteht. Das Ostium tympanicum liegt nach vorn und ziemlich nahe am Dach der Paukenhöhle; das Ostium pharyngeum im Pharynx, in gleicher Höhe mit dem hinteren Ende der unteren Nasenmuschel. An der Uebergangsstelle zwischen Knorpel und Knochen ist die Tuba am engsten, 2 mm. hoch und 1 mm. breit, die Paukenmündung hat 5 mm. Höhe und 3 mm. Breite; das Ostium pharyngeum 9 mm. Höhe und 5 mm. Breite.

Die Schleimhaut der Tuba trägt ein geschichtetes Flimmerepithelium, welches in der Richtung nach dem Pharynx zu arbeitet. Im submucösen Gewebe finden sich namentlich in der Nähe des unteren Randes des Tubenspaltes, erhebliche Mengen von Schleimdrüsen, ausserdem, nach GERLACH⁶⁸, Balgdrüsen. An der medialen Wand des Ganges liegt eine Knorpellamelle, welche an dem tympanalen Ende mit der Bandmasse des Foramen lacerum anterius verwachsen ist, nach dem Pharynx zu sich von der Schädelswand frei macht, und welche sich mit ihrem oberen Rande lateralwärts über den Tubenkanal hinüberbiegt, so dass sie im Durchschnitt eine hakenförmige Gestalt zeigt.

An dieser Knorpelkante, oder nach TRÖLTSCH⁶⁹ noch mit von der Tubenschleimhaut, entspringt der Tensor palati, während ohne Verbindung mit letzterer der Levator unterhalb des Tubenkanals ver-

67 LOEWENBERG, L'échange des gaz d. l. caisse d. Tympan. Mémoire présenté à l'Académie. 20. nov. 1876. Progrès médical 1877.

68 GERLACH, Zur Morphologie d. Tuba. Sitzungsber. d. phys.-med. Societät zu Erlangen 1875.

69 TRÖLTSCH, Beiträge zur anat.-physiol. Würdig. der Tuben- u. Gaumenmusculatur. Arch. f. Ohrenheilkunde. I. S. 15. 1864.

läuft. Ueber die Gestalt des Kanals, welche an Durchschnitten microscopirt worden ist, scheint eine definitive Uebereinstimmung noch nicht erreicht zusein. Während RÜDINGER auf Grund zahlreicher ver-

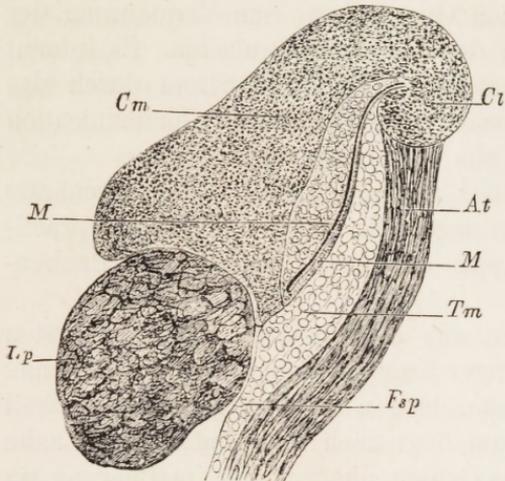


Fig. 20. Querschnitt der knorpeligen Ohrtrumpete, etwa in der Mitte ihres Verlaufs (nach v. TRÖLTSCHE). *Cm* Medialer Knorpel. *Cl* Lateral Knorpel (Knorpelhaken). *Tm* Häutiger Tubenabschnitt nach unten in die Fascia salpingo-pharyngea *Fsp* übergehend. *M* Drüsenreiche Schleimhaut am medialen Knorpel. *Mss* Musc. sphenosalpingo-staphylinus, sc. Tensor palati. *Lp* Musc. petrosalpingo-staphylinus si Levator palati.

gleichend anatomischer Arbeiten ⁷⁰ behauptet, dass, abgesehen von einer kurzen Strecke am tympanalen Theil des Tubenknorpels, der Tubenkanal in seinem Theil unter dem Knorpelhaken offen stehe, haben andere, wie z. B. TRÖLTSCHE, diese Angabe nicht bestätigen können, sondern vertreten die Ansicht, dass in der Ruhe und in der Norm die Wände des Kanals sich überall berühren.

Das Schlundostium ist durch den Finger und durch Rhinoscopie, welche theils nach dem Vorgang von J.

CZERMAK ⁷¹, mit nach oben gewandtem und etwas modificirtem Kehlkopfspiegel, theils bei etwas weiten Nasengängen von dort aus, mit Hilfe intensiver Lichtquellen ausgeführt wird, zur Beobachtung zu bringen. Dasselbe ist Gegenstand eingehender Studien geworden, jedoch genügt es für die Physiologie aus der folgenden Figur S. 55 nach ZAUFALE ⁷² und deren Erklärung sich zu instruiren; wir werden darauf bei Besprechung der Tubenbewegung zurückkommen.

In die Tuba kann bekanntlich leicht ein Katheter eingeschoben werden, aber auch bis in das Cav. tympani hat man feine Röhren zu führen vermocht.

A) Function der ruhenden Tuba.

MACH und KESSEL ⁽⁶⁶⁾ haben an Gehörpräparaten experimentell nachgewiesen, dass eine gleichzeitige Zuleitung des Schalls von der Tuba und dem Gehörgang aus, die Bewegung des Trommelfells herabsetzt oder verhindert; ein Resultat, welches mit der Theorie völlig im Einklang steht. Die ruhende Tuba würde demnach die Function

⁷⁰ RÜDINGER. Die Ohrtrumpete in STRICKER'S Lehre v. d. Geweben und Monatschrift f. Ohrenheilkunde. 1867 u. 68.

⁷¹ J. CZERMAK, Der Kehlkopfspiegel u. seine Verwerthung. Leipzig 1860.

⁷² ZAUFALE, Die normalen Bewegungen d. Rachenmünd. d. Eustachischen Röhre. TRÖLTSCHE'S Arch. IX. u. X. 1875 u. 76.

haben, vermittelt der Flimmerhärchen als Abzugskanal für etwa in der Paukenhöhle sich anhäufende Flüssigkeit zu dienen. Dieser Strom ist jedenfalls schwach, denn man hat ihn z. B. beim Einführen von Milch in die Paukenhöhle noch nicht beobachtet, aber es ist nicht einzusehen, wie er fehlen sollte. Die Tuba hat ferner einen, wenngleich wenig festen, Verschluss gegen die Luft des Schlundraumes zu bilden. Nachdem TOYNBEE⁷³ letzteren Sachverhalt scharf betont hatte, wurde

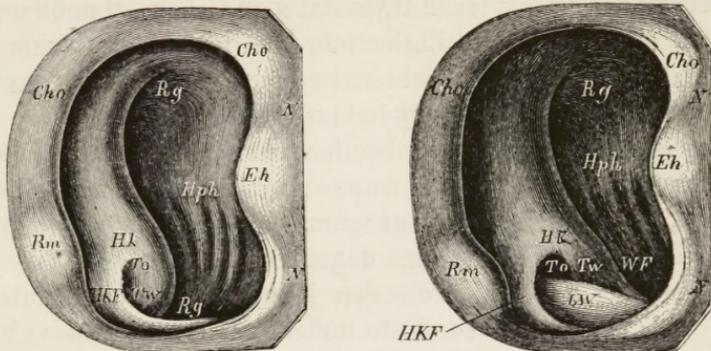


Fig. 21. Halbschematisch. *A* Tuba geschlossen. *B* Tuba offen. *N* Nasenscheidewand. *Eh* Erhöhung an derselben. *Cho* Choane. *Rm* untere Nasenmuschel, hier rudimentär. *Hph* Hintere Pharynxwand. *Rg* Rosenmüller'sche Grube. *Tw* Tubenwulst. *To* Tubenostium. *Hk* Haken. *HKF* Hakenfalte. *Wf* Wulstfalte. *Lw* Levatorwulst.

von mehreren Seiten Bedenken dagegen erhoben. LUCAE⁷⁴ und SCHWARTZE⁷⁵ beschreiben nämlich Respirationsbewegungen des Trommelfells, welche auf ein Offenstehen der Tuba, während eines Abschnitts dieses Aktes, bezogen werden müssen. Es lassen sich aber diese Bewegungen an der Mehrzahl gesunder Ohren nicht mit genügender Deutlichkeit nachweisen, und für das, was man sieht, kommt in Betracht, dass kleine Druckschwankungen schon durch Lumenänderungen der Tuba ohne Eröffnung derselben, und durch die mit der Respiration wachsende Füllung der Gefässe an der ausgedehnten Oberfläche des Cavum tymp. hervorgerufen werden können. Die Dichtigkeit des Tubenverschlusses gegen äusseren Druck erweist sich als ziemlich erheblich. Beim Aufenthalt in Räumen mit comprimierter Luft kann nämlich eine ziemlich schmerzhaft Spannung des Trommelfells (Druck über 100 mm. Hg) eintreten, ohne dass Luft durch die normale Tuba hindurch gepresst und so die Spannung behoben wird (MAGNUS⁷⁶, HARTMANN⁷⁷). In anderen Fällen, WEBER LIEL⁷⁸,

73 TOYNBEE, Diseases of the ear. p. 133. 1852. (Nicht eingesehen.)

74 LUCAE, Respirationsbeweg. d. Trommelfells. TRÖLTSCHE'S Arch. I. S. 96. 1865.

75 SCHWARTZE, Respirat.-Beweg. d. Tr. Ebenda. S. 139.

76 MAGNUS, Verhalten d. Gehörorg. in comprimierter Luft. Ebenda I. S. 269.

77 HARTMANN, Experimentelle Studien üb. d. Function d. Eustachischen Röhre. Leipzig, Veit. 1879.

78 WEBER LIEL, Zur Physiol. d. Tuba. Monatsschr. No. 7. 1868.

ist allerdings ein allmählicher Ausgleich ohne absichtliche Eröffnung der Tuba beobachtet worden, aber dieser ging doch so langsam, dass von einem wirklichen Offenstehen nicht die Rede sein kann. Durch Compression der Luft in Mund und Nase kann man deren Durchtritt durch die Tuba erzwingen und fühlt dann, dass eine Anspannung des Trommelfells eintritt (der sog. VALSALVA'sche Versuch), man bemerkt dabei aber stets, dass die Luft bei einem individuell wechselnden Druck (nach HARTMANN zwischen 20 u. 50 mm. Hg) plötzlich eindringt. Die Entleerung der Luft vom Cavum nach aussen geht dagegen viel leichter, und bei stärkeren Druckschwankungen unter Bildung von Schleimblasen, vor sich.

Wir wissen, dass die Schallwellen ohne merkliche Schwächung zu dem Trommelfell durch den äusseren Gehörgang selbst dann vordringen, wenn derselbe fast ganz mit Epithelien u. s. w. verstopft ist, durch die Tuba dringt dagegen kein Geräusch ein. Wenn nämlich tönende Körper durch den Mund dem Ostium tubae genähert werden, so werden sie desto undeutlicher vernommen, je tiefer sie eingeführt werden. Sobald die Tuba eröffnet wird, ändert sich dies, namentlich tritt die, mit dem Namen Autophonie bezeichnete Erscheinung ein, dass nämlich dabei die eigene Sprache stark hallend im Inneren des Ohrs vernommen wird.⁷⁹ Auch von Anderen kann auscultatorisch ein auffallendes Heraussprechen aus dem Ohr des Betreffenden gehört werden.⁸⁰ Man hat diese Erscheinung beim Gähnen. Einzelne Autoren haben die Erfahrung gemacht, dass sie willkürlich die Autophonie bei sich eintreten lassen können.

Nach diesen Erfahrungen steht fest, dass die Tuba weder dicht geschlossen ist, noch weit offen steht. Will man die Norm noch enger begrenzen, so ist der leichte Verschluss mehr normal, als ein noch so geringes Klaffen. Bei den Cetaceen steht die Tuba offen.

B) Bewegung der Eustachischen Röhre.

Ungleichheit des Luftdrucks innen und aussen am Trommelfell würde die Spannung desselben ändern. Man kann die Ungleichheit künstlich durch den negativen oder positiven, von POLITZER modificirten VALSALVA'schen Versuch erzeugen, d. h. während des Schluckaktes treibt man die Luft von der verschlossenen Mundhöhle aus durch Pressung in die Trommelhöhle ein, oder zieht sie durch Verdünnung mittelst intendirter Inspiration bei verschlossenen Ostien heraus. Seit JOH. MÜLLER (¹³) ist es bekannt, dass die durch

⁷⁹ POORTEN, RÜDINGER, FLEMMING. Monatsschrift No. 9. 1872. No. 2. 1874. No. 6. 1875 und YULE, Journ. of Anat. and Physiol. 1874. (Nicht eingesehen.)

⁸⁰ GRUBER, Monatsschr. No. 8. 1868.

den Luftdruck veränderte Spannung des Trommelfells eine Veränderung der Hörfähigkeit herbeiführt; im Allgemeinen erfolgt wohl eine Abnahme derselben, die aber am auffallendsten für tiefere Töne ist. Die Verschiedenheit des Luftdrucks wird bei verschlossenen Tuben offenbar bei jeder Aenderung des atmosphärischen Drucks eintreten müssen, ferner in Folge einer Luftresorption oder Exhalation in der Paukenhöhle. Die ungleiche Spannung der Luft wird sich ausgleichen, sobald die Tuba sich öffnet; da aber nennenswerthe Aenderungen des äusseren Luftdrucks sich in der Regel nur langsam machen, wird es genügen, wenn nur die Tuba von Zeit zu Zeit sich öffnet. Die Herstellung einer zeitweiligen Verbindung zwischen Trommelhöhle und Rachen ist demnach eine dritte Aufgabe, welche die Tuba zu erfüllen hat; wir werden Bedingungen und Mechanismus dieses Processes zu untersuchen haben.

Die Versuche der Ohrenärzte über den Grad des Drucks, welcher bei verschiedenen Bewegungen im Rachenraum nöthig ist, um Luft aus der Nase in die Pauke zu treiben, zwingen dazu, verschiedene Grade der Annäherung zur Eröffnung der Tuba anzunehmen. Starke Respiration, Phonation (das Wort: huk, GRUBER⁸¹), endlich der Schluckakt (TOYNBEE⁸², POLITZER⁸³), würden die drei Stufen dieser Reihe sein. Beim Schlucken dringt die Luft jedenfalls am leichtesten in die Paukenhöhle; als HARTMANN⁽⁷⁷⁾ den dafür erforderlichen manometrischen Druck zu bestimmen suchte, fand er zwar noch im Minimum 30 mm. Wasserdruck, aber er macht geltend, dass ein, durch den VALSALVA'schen Versuch gespanntes Trommelfell nach dem Schluckakt völlig in die normale Stellung zurücktrete. Insofern hier die Spannkräfte geschaffen waren, welche die schwach schliessende Tuba durch Druck öffnen konnten, ist die Beobachtung noch nicht streng dafür beweisend, dass die Tube sich *aktiv* eröffnet. Nur die Autophonie dürfte voll beweisend für aktive Eröffnung sein, aber sie ist beim Schluckakt nicht wohl zu prüfen.

LUCAE⁸⁴, der mit Anderen den Zustand der Tuba noch genauer präcisiren will, als in Obigem geschehen und auf dessen Deductionen daher verwiesen werden muss, bemerkt, dass sowohl Saugen wie starker Expirationsdruck (Schneuzen) die Luft in der Pauke bewege, sowie dass beim Schlucken zuerst ein positiver, dann ein negativer Druck dort entstehe. (Letzteres zuerst von POLITZER beobachtet.)

81 GRUBER, Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. No. 10 u. 11. 1875.

82 TOYNBEE, Proceedings of the Royal Society. 1853. (Nicht eingesehen.)

83 POLLITZER, Beleuchtungsbilder d. Trommelfells. S. 138. 1865.

84 LUCAE, Arch. f. pathol. Anat. a. LXIV. S. 476. 1875. b. LXXIV. 1878.

Ueber die Bewegung des Ostium pharyngeum existiren zahlreiche rhinoscopische Beobachtungen an besonders dazu geeigneten normalen und pathologischen Fällen; unsere Darstellung wird sich an die Beschreibung von ZAUFAL⁽⁷²⁾ und MICHEL⁽⁸⁵⁾ halten.

Beim Schlucken und in Begleitung der Erhebung und Senkung des weichen Gaumens ändert sich das Ostium in auffallender Weise (Fig. 21 B S. 55). Den Anfang der Bewegung scheint die Plica salpingopalatina zu machen, welche etwas lateral ausweicht und sich stärker krümmt. Darauf geht der Tubenwulst rückwärts nach der Mittellinie zu und etwas nach oben. Gleichzeitig zieht sich die Pars pterygoidea des oberen Schlundkopfschnürers zusammen und bildet einen Wulst zur Seite der Raphe. Im Tubenostium, und zwar am Boden desselben, erhebt sich eine First, welche von dem contrahirten Levator palati herrührt. Nun erst tritt der Augenblick ein, wo die Tubenspalte sich eröffnet, dieselbe klafft unten zuerst und am weitesten, sie hat dabei die Gestalt eines Dreiecks, dessen Spitze sich in eine, den oberen Abschnitt der Tubenspalte bezeichnende Linie auszieht.

Mit dieser Beschreibung dürfte es übereinstimmen, wenn LUCAE^(84b) findet, dass die Eröffnung der Tuba im Beginn des Hinunterschluckens, wo der weiche Gaumen herabsinkt, stattfindet.

Ob die beschriebenen Bewegungen zu einer Eröffnung des ganzen Tubenkanals führen, lässt sich nicht entscheiden. Diejenigen, welche willkürlich die Tuba zu eröffnen vermögen, so z. B. FLEMING⁽⁷⁹⁾ sprechen von einem vorbereitenden Akt, der von einem knackenden Geräusch begleitet sei, und von der definitiven Eröffnung. Allerdings sahen wir, dass auch an dem Ostium eine Reihenfolge von Processen sich abwickelt, so dass die Möglichkeit, es sei das Beobachtete schon die Eröffnung des ganzen Kanals, wenigstens offen zu halten ist. Dabei würden dann also die Schlundschnürer eine wesentliche Rolle spielen. Seit TOURTUAL'S⁸⁶ Arbeit hat man den Levator und Tensor veli palatini in Beziehung zur Bewegung der Tuba gebracht. POLITZER⁸⁷ wies nach, dass beim Hunde die Eröffnung durch Reizung des Trigemini im Schädel zu bewirken sei. Die in dem einen untersuchten Fall am abgetrennten Schädel beobachtete Bewegung sei auf die Thätigkeit des Tensor veli zu beziehen gewesen, der vom Trigemini innervirt werde. TRÖLTSCH⁽⁶⁹⁾ ver-

85 MICHEL, Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. No. 11. 1875.

86 TOURTUAL, Neue Untersuchung. üb. d. Bau d. menschl. Schlundes u. Kehlkopfes. Leipzig 1846.

87 POLITZER, Beziehg. d. Trigemini z. Eustachischen Ohrtrompete. Würzb. naturw. Ztschr. S. 92. 1861.

tritt lebhaft auf Grund anatomischer Studien die eröffnende Function dieses Muskels, indem er betont, dass derselbe nicht nur an der Knorpelkante, sondern auch an der Schleimhaut entspringe und an dem Hamulus pterygoideus einen festen Halt für den Zug auf die Tuba habe. Mit HENLE⁸⁸ finde ich die Zugrichtung des Muskels für die Function als Eröffner der Tuba recht ungünstig, es sei denn, dass letztere stark medialwärts gezogen worden sei, ehe er angreift. Wenn gar, wie es RÜDINGER⁽⁷⁰⁾ stets fand, der Tensor nur von der lateralen Knorpelkante entspringt, dürfte die Kraft, welche dann die Eröffnung durch den Muskel erfordern würde, die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit überschreiten.

Die Frage liegt so schwierig, dass zur Entscheidung eine vivisektorische Untersuchung unentbehrlich erscheint. Inzwischen ist daran zu erinnern, dass die Tuba bei den kaltblütigen Wirbelthieren (so wie bei den Cetaceen) weit offen steht und daher ein ausgeprägter Muskelmechanismus aus phylogenetischen Gründen nicht zu erwarten ist.

4. *Tensor tympani und Stapedius.*

Die relativ mächtigen Muskeln der Paukenhöhle sind quergestreift. Der Tensor, 2,2 cm. lang⁸⁹, in einem knöchernen Halbkanal parallel der Tuba verlaufend, ist von einer starken Scheide umgeben. Indem seine Sehne rechtwinklig umbiegend, sich aus dem Knochenkanal heraus durch das Cavum tympani an den Hammerstiel begiebt und sich etwas unterhalb des Proc. brevis ansetzt (Fig. 10 S. 31), strahlt sie namentlich über den vorderen Rand des Hammers aus (GRUBER⁴¹). Die Scheide des Muskels überkleidet, nachdem sie sich an den Proc. cochleariformis fixirte, die Sehne mehr oder weniger fest (TOYNBEE,³⁷) und bewirkt, dass die Beweglichkeit der Sehne (beim Menschen!) eine sehr beschränkte wird (MAGNUS⁴⁷), ohne dass deshalb, nach Ansicht der meisten Untersucher, die Einwirkung des Muskels auf das Trommelfell aufhörte. Der Muskel zieht das Trommelfell nach innen, ohne dabei den Hammer erheblich um seine Queraxe zu drehen. Er giebt, wie HELMHOLTZ⁽³²⁾ hervorhebt, schon in der Ruhe dem gesammten Trommelfell-Bandapparat eine, von der Elasticität des Muskels abhängende Spannung, welche ein Schlottrigwerden des Apparates verhindert.

Die Innervation des Muskels geschieht, wie POLITZER⁹⁰ experi-

88 HENLE, Handb. d. systemat. Anatomie. II. S. 117. 1862.

89 WEBER, Muscul. tensor tymp. Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. No. 10. 1872.

90 POLITZER, Beitr. z. Physiol. d. Gehörorgans. Sitzungsber. d. Wiener Acad. S. 427. 1861.

mentell nachgewiesen hat, durch den Trigemini, welcher einen Zweig durch das Ganglion oticum an den Muskel abgiebt. VOLTOLINI⁹¹ bestätigt dies, findet aber, dass auch der Facialis den Muskel innervirt, doch würden nach POLITZER Stromesschleifen im Trigemini an letzterer Angabe Schuld tragen. Das experimentelle Verfahren, von VOLTOLINI⁹² angegeben, ist Folgendes. Der Kopf wird von dem Rumpf des frisch getödteten Thiers (untersucht sind Hund, Schaaf, Kalb, Kaninchen, Katze und Meerschweinchen) abgenommen, das Gehirn entfernt und die Bulla ossea genügend eröffnet, um den Hammergriff oder was sonst gewünscht wird, zu übersehen.

Die Reizbarkeit besteht genügend lange, namentlich wenn die Theile warm gehalten werden. Um die Bewegung zu beobachten wird das Trommelfell rings umschnitten, oder ein Manometer luftdicht in den Gehörgang gefügt oder endlich ein Fühlhebel (Heftpflaster) an die Theile geheftet.

Der Stapedius, welcher aus seiner Knochenkammer von hinten her seine Sehne an den Kopf des Steigbügels und z. Th. an das Ossiculum Sylvii sendet, wird von dem Facialis versorgt, wie anatomisch und von POLITZER⁽⁹⁰⁾ experimentell nachgewiesen ist. Er bewegt den Steigbügeltritt so, dass derselbe mit seiner vorderen Peripherie in das Cavum tympani, mit der hinteren ein wenig in das Labyrinth vorrückt. Zugleich spannt sich die Circularmembran ringsum. POLITZER⁹³ (90), der theils an Präparaten, theils am noch reizbaren Hundekopf die Verhältnisse prüfte, erklärt den Stapedius für einen Antagonisten des Tensor. Wenn er wirkt, bewegt sich das Trommelfell nach aussen (erschläfft), und wenn der Druck im Labyrinth an dem, in einen Halbcirkelkanal eingesetzten Manometer gemessen wird, zeigt er sich vermindert.

Fast alle Beobachter, welche die Schwingungen der Gehörknöchelchen untersuchten, haben auf den Einfluss der Muskeln dabei geachtet, doch haben KESSEL⁽⁶⁰⁾ und MACH⁽⁶²⁾, nach den bereits angegebenen Methoden, besonders genaue Resultate erhalten. Die zur Tonzuführung benutzten Orgelpfeifen hatten zwischen 256 und 1024 v. d. Der Muskelzug wurde durch eine, soweit angegeben, schwache (3 Gramm) Belastung der mit Hülfe eines Fadens verlängerten Sehne ersetzt. Bei Tenotomie des Tensors vermehren sich die Schwingungen des Trommelfells um ein Viertel. Bei Anspannung desselben verhalten sich die verschiedenen Theile der Membran verschieden

91 VOLTOLINI, Welches Nervenpaar innervirt d. Tensor? Arch. f. path. Anat. LXV.

92 Derselbe, Anat. u. pathol.-anat. Unters. Arch. f. pathol. Anat. XVIII. S. 42.

93 POLITZER, Zur Anatomie d. Gehörorgans. TRÖLTSCHE'S Arch. IX. S. 158. 1875.

und zwar entsprechend der etwas verschiedenen Spannung, welche die einzelnen Fasern dabei gewinnen. Bei einfachen Tönen vermindert sich die Schwingung beim Zug des Tensor und zwar mehr in den vorderen wie in den breiteren, hinteren Partien. Als Grundton und Octave zugeleitet wurden, stellte Ziehen am Stapedius die Bewegung etwas wieder her. Beim Ziehen am Tensor wird am vorderen Theil Grundton und Octave verlöscht, am hinteren Abschnitt erlischt zuerst die Octave; an der Membr. flaccida (mittlerer Sector KESSEL) erlischt, wenn der Zug überhaupt dazu ausreicht, zuerst der Grundton. Die später ⁽⁶²⁾ am Hammerkopf angestellten Versuche stimmen mit obigen Resultaten nur mittelmässig überein. Bei Anspannung des Tensor tritt die, von dem tieferen Ton hervorgerufene Schwingung bei weitem leichter und auffallender zurück, wie diejenige des höheren Tons, namentlich wenn als letzterer nicht die Octave, sondern der vierte Theilton zur Verwendung kommt. In anderen Worten: die Anspannung des Tensor schwächt innerhalb der untersuchten Grenzen die höheren Töne merklich weniger wie die tiefen. Die Anspannung der Sehne des Stapedius hatte keinen merklichen Einfluss auf die Schwingungen.

Diese Versuche am todten Ohr können über die Function des lebenden Muskels noch nicht entscheiden, zur Auffindung derselben sind wir auf die Hypothese und den directen Versuch angewiesen.

Die älteren Autoren, denen für die Wirkung von Binnenmuskeln in einem Sinnesorgan nur die Iris einen Anhaltspunkt gewährte, neigten sich der Ansicht zu, dass durch die Binnenmuskeln die Bewegung des Schallzuleitungs-Apparates gedämpft werde ^(HARLESS 17. S. 381, 384). Es ergab sich allerdings bald, dass *momentanen* Schallerschütterungen nicht rasch genug durch die Muskelthätigkeit werde vorgebeugt werden können. Unser Trommelfell muss und kann in der That selbst den Knall moderner Geschütze in grosser Nähe wenigstens einige Male ohne Nachtheil ertragen. Es ging dann die Ansicht dahin, dass die, in Folge solcher Stösse eintretenden störenden Nachschwingungen, würden gedämpft werden können. Es wurde aber auch schon den Muskeln das Vermögen, einzelne Töne zu schwächen, andere hervorzuheben, zugeschrieben. Seit WOLLASTON'S ⁹⁴ und JOH. MÜLLER'S ^(13. S. 436) Versuchen ist es nämlich bekannt, dass bei Spannung des Trommelfells (mittelst des VALSALVA'schen Versuchs) tiefere Töne undeutlicher gehört werden, wäh-

94 WOLLASTON, Philosoph. Transactions. p. 310. 1820.

rend die höheren wenigstens nicht schwächer, vielleicht absolut stärker wirken.

Es wurde näher gelegt, diese Accommodation für verschiedene Tonhöhen anzunehmen, als der Accommodationsvorgang im Auge genauer bekannt wurde. Namentlich MACH⁽⁵³⁾ hat diese Annahme verfolgt. Er hat in diesem Sinne eine leicht zu wiederholende Beobachtung gedeutet.⁹⁵ Schlägt man eine Reihe von Tönen, z. B. den vollen Accord, am Fortepiano an und setzt dann in aufsteigender Reihe eine Taste nach der anderen in Ruhe, so klingt jedesmal der nächst höhere Ton verstärkt ins Ohr. Dabei geht, wie ich finde, die Klangfarbe verloren, der Ton klingt wie ein Oberton, also eine reine Sinusschwingung. Es ist nicht deutlich erkennbar ob und inwieweit der Accommodation bei dieser Wahrnehmung eine Rolle zukommt.

L. FICK⁹⁶ hat geglaubt, dass bei Contraction der Kaumuskeln der Tensor sich mit bewege und stützte diese Ansicht namentlich dadurch, dass dabei an einem in den Gehörgang eingesetzten Manometer eine negative Druckschwankung beobachtet werde. Diese Druckschwankung scheint jedoch andere Ursachen haben zu müssen, da LUCAE⁹⁷ dabei eine begleitende Einziehung des Trommelfells nicht finden konnte. LUCAE glaubt jedoch die Mitbewegung des Tensor aufrecht erhalten zu können, indem er sich auf die Ansicht von GRUBER⁹⁸, dass der Hammer etwas nach einwärts gehen könne ohne das Trommelfell mitzunehmen, beruft.

Bei diesem Versuch werden sämtliche musikalische Töne, namentlich die tiefsten und höchsten (Tab. I) deutlicher gehört.

Wenn man eine Gruppe der mimischen Gesichtsmuskeln, namentlich den Orbicularis palpebr. innervirt, so lässt sich nach LUCAE das Einstrahlen dieser Impulse in die Bahn des N. stapedius nachweisen. Es wächst nämlich dabei der Druck im Gehörgang. An Trommelfellen, an denen die pathologische, sog. hintere Trommelfellfalte sich findet, verstreicht diese in Folge einer Auswärtsbewegung des Leitungsapparates. Während dieses Vorgangs werden die musikalischen Töne schwächer gehört, nur Töne von mehr als 10000 Schwingungen kommen verstärkt zur Wahrnehmung. Schon öfter sind Bewegungen an der Tuba, mit denen Lumensveränderungen der Pauken-

95 MACH, Bemerk. über d. Accommodation d. Ohrs. Sitzgsber. d. Wiener Acad. S. 343. 1865.

96 L. FICK, Arch. f. Anat. u. Physiol. S. 526. 1850.

97 LUCAE, Die Accommodation o. d. Accommodationsstörungen d. Ohrs. Berliner klin. Wochenschr. No. 14. 1874.

98 GRUBER, Anat.-physiol. Studien über d. Trommelfell. S. 38. Wien 1867.

höhle verbunden sein können, auf Thätigkeit der Binnenmuskeln bezogen. In Anbetracht der sehr labilen Stellung der Trommelfellausbuchtungen könnten die vorstehenden Beobachtungen auf Tubenbewegung zurückzuführen sein, aber es zeigt sich, dass sie doch wohl den Stapedius betroffen haben.

Die Contraction des Tensor ist bei einzelnen Individuen willkürlich. Die dabei zu machenden Beobachtungen sind am ausführlichsten von SCHAPRINGER⁹⁹ beschrieben worden. Bei der willkürlichen Einziehung des Trommelfells entsteht ein Druckgefühl im Ohr und es werden starke Muskelgeräusche* gehört. Man konnte die Bewegung des Trommelfells sowohl direct deutlich sehen, als auch mittelst des eingeführten Manometers beobachten. Bei dieser Thätigkeit des Tensor wurden die tiefsten Töne bis zu etwa 70 Schwingungen ganz ausgelöscht, von da an erschienen sie geschwächt und leerer in der Klangfarbe, bei noch höheren Tönen verlor sich dies und Töne der dreigestrichenen Octave (1000—2000 Schw.) erschienen, trotz der begleitenden Muskelgeräusche verstärkt. Wenn sein Ohr mittelst eines, in den Gehörgang luftdicht eingeführten Kautschukschlauches von einem zweiten Beobachter auscultirt wurde, erschien für diesen, nicht aber für SCHAPRINGER selbst eine Verstärkung von 310 Schwingungen an unzweifelhaft (der Ton wurde von den Zähnen aus zugeleitet). Diese Erfahrung versuchte man durch die Annahme zu erklären, dass die Schwingungen des Trommelfells, nicht aber die, des, durch den Muskel fixirten Hammers, vermehrt worden seien. Die höheren Theiltöne einer Theiltonreihe wurden bei Einziehung des Trommelfells unvergleichlich deutlicher vernommen, wie ohne Einziehung desselben.

Alles Bisherige trifft zwar die Contraction der Muskeln, aber ein Nachweis über die a priori anzunehmende Thätigkeit derselben beim Hören ist darin nicht enthalten. An dem, in SCHAPRINGER'S Gehörgang eingefügten Monometer, der deutlich die Einziehung des Trommelfells erkennen liess, konnte beim wechselnden Horchen auf hohe und tiefe Töne nicht die geringste Bewegung bemerkt werden. Die gleiche Erfahrung hatte MACH⁽⁵³⁾ an sich selbst und Anderen gemacht. Derselbe hat es dabei jedoch nicht bewenden lassen, sondern hat mit dem Apparat Fig. 19 und stroboscopischen Verfahren⁽⁶²⁾ das Trommelfell des Lebenden untersucht; aber auch bei diesen Versuchen glückte es nicht, bei der Zu-

99 SCHAPRINGER, Ueb. d. Contraction d. Trommelfellspanners. Sitzgsber. d. Wiener Acad. S. 571. 1870.

* Ueber diese s. die subjectiven Geräusche.

leitung der Töne zum Ohr irgend eine Einziehung oder sonst auf Muskelaction deutende Bewegung, wahrzunehmen.

Auf Grund dieser negativen Erfahrungen und nachfolgender Erwägungen glaubte HENSEN⁽¹⁰⁰⁾ eine andere Wirkungsweise des Tensor erwarten zu dürfen. Da die Muskeln quergestreift sind, kann ihnen eine sehr rasche Action zugemuthet werden. Es dürfen dabei aber nicht mehr wie zwei oder höchstens drei Zuckungsstösse sich folgen, wenn der Muskelton vermieden werden soll. Dieser Ton wird nämlich beim gewöhnlichen Hören nicht bemerkt, während wir doch wissen, dass er beim Tetanus des Tensor auftritt. Die Spannung des Tensor wird die Abstimmung des Trommelfells erhöhen müssen, also die Empfindung hoher Töne verschärfen, die der niedrigsten Töne wahrscheinlich verschlechtern. Durch Spannung des Trommelfells tritt aber die Dämpfung relativ zurück, es schwingt also nicht so rasch ab. Es scheint daher (und Erfahrungen an anderen Membranen bestätigen dies), dass die Spannung des Tensor für die Wahrnehmung der, aus kurz dauernden Stössen bestehenden Geräusche, ungünstig wirken müsse, während sie die Summirung der Reihen regelmässiger Schwingungen, also der Töne im Allgemeinen begünstigen dürfte. Da z. B. beim Sprechen den Vokalen sehr häufig Geräusche (Consonanten) voraufgehen, da sogar, wie wir später sehen werden, die zwei oder drei ersten Schwingungen eines Tones noch nicht genügen, um eine Tonempfindung hervorzurufen, dürfte an die Möglichkeit gedacht werden, dass der Muskel nur zu Anfang jeder Schallerregung in einzelnen Stössen zucke. Auf diese Weise würden sich auch die Misserfolge der früheren Beobachter erklären, da bei deren Methode sehr wohl eine so kurze, in den Anfang jedes Versuchs fallende, Bewegung des Trommelfells entgehen kann.

Um die Bewegung zu studiren wurde an curarisirten Thieren (Hund und Katze) die Paukenhöhle von unten eröffnet und in die Sehneninsertion des, bei diesen Thieren nicht von Knochen umschlossenen Muskels, eine feingefeilte Nähnadel eingestossen. Jede Bewegung des Muskels wurde durch deren freies Ende in vergrössertem Maasse wieder gegeben. Bei den Versuchen entstand der Erwartung entsprechend bei jedem Geräusch, jedem Toneinsatz, beinahe jeder Sylbe, ein Ausschlag der Nadel. Dagegen konnte ein Tetanus nicht erzeugt werden. Beim Anhalten eines Tons kam die Nadel zur Ruhe, zeigte dann aber sogleich Zuckungen an, sobald neue Geräusche hinzutraten. Tiefe Töne von unter 200 Schwingungen, selbst wenn sie

100 HENSEN, Beob. üb. d. Thätigkeit d. Trommelfellspanners. Arch. f. (Anat. u.) Physiol. S. 312. 1878.

unmittelbar ins Ohr geblasen wurden, geben keine oder nur zweifelhafte Bewegungen der Nadel, hohe Pfeifen von 3000 und mehr Schwingungen, selbst wenn sie ausserhalb des Versuchsraums und in mehr wie 10 Meter Entfernung angeblasen wurden, erregten den Tensor kräftig. Die Reactionszeit des Muskels wurde in vorläufigen Versuchen bestimmt, sie betrug 0,092 und 0,075 Sec. im Mittel, sie dürfte unter normalen Verhältnissen kürzer sein.

Nach diesen Erfahrungen scheint also der Tensor auf reflectorischem Wege durch das Eintreten einer Trommelfellschwingung, nicht aber durch das Andauern derselben erregt zu werden. Es lassen sich über den möglichen Sinn dieses Verhaltens nur Vermuthungen aussprechen. Dass durch die Zuckung eine genaue Abstimmung des Trommelfells für den erregenden Ton, wenngleich nur auf kurze Dauer bewirkt werde, wäre eine Hypothese, die einen zu complicirten Mechanismus verlangt um wahrscheinlich zu sein. Es ist aber von MACH⁽⁶²⁾ die mathematisch noch nicht untersuchte Beobachtung gemacht worden, dass das Trommelfell leichter für höhere Töne mitschwingt, wenn es zuvor durch tiefere Töne in Bewegung gesetzt wurde. Ist dies, wie nicht zu bezweifeln, richtig, so wird es wohl zweckmässig sein, das Trommelfell beim Er tönen eines Klanges die verschiedenen Grade von Spannung durchlaufen zu lassen, weil dabei die passendste Spannung getroffen werden muss. Die in diesem Moment auftretenden Schwingungen dauern dann leichter fort, auch wenn das Trommelfell nachträglich sich wieder verstimmt. Analoge Erfahrungen lassen sich an spannbaren, ebenen Membranen gewinnen.

Die Zuckungen des Tensor erfolgen noch, wenn dessen Sehne abgeschnitten worden ist, werden also nicht durch Erschütterungen des Trommelfelles als eine Art von Sehnenreflexen hervorgerufen.

In Bezug auf die Thätigkeit des Musculus stapedius ist bereits erwähnt worden, dass LUCAE⁽⁹⁷⁾ eine Contraction desselben bei starker Innervation des Orbicularis palpebrarum findet. Dabei beobachtet er eine Abschwächung des Hörens sämmtlicher musikalischen Töne, eine Verstärkung derjenigen von 10000 und mehr Schwingungen. Es ist mir neuerdings einmal geglückt, beim Hunde eine Nadel durch die Sehne des Stapedius zu führen. Die Nadel stand mit ihrer Spitze in dem Nervus facialis. So lange der Musculus tensor tympani intact war zuckte sie energisch bei Angabe aller Töne, wahrscheinlich in Folge mechanischer Bewegung der Gehörknöchelchen durch ersteren Muskel. Nach Durchtrennung der Sehne des Tensor zuckte die Nadel im Stapedius nur noch bei Angabe hoher Töne

etwa von 7000 Schwingungen an. Bei tieferen Tönen wurde der Ausschlag undeutlich und gewiss wirkten die Töne der grossen und Contra-Octave gar nicht.*

ZWEITES CAPITEL.

Die Functionen des Labyrinths.

Die Gehörempfindung wird in dem häutigen Labyrinth ausgelöst. Dasselbe liegt in einer fast ganz geschlossenen Knochenhöhle, von welcher es nur einen kleinen Theil ausfüllt. Der restirende Raum der Höhlung ist von der Perilymphe erfüllt. Diese, bei dem allmählichen Schwund embryonalen Gallertgewebes entstanden, enthält nach DÄNHARDT¹⁰¹, der namentlich den Dorsch untersuchte, 2% feste Bestandtheile, darunter durch Mineralsäuren, aber nicht durch Kochen, fällbares Eiweiss, ferner Schleim und einen durch Salpetersäure und Ammoniak sich dunkel kirschroth färbenden Bestandtheil; bei den Fischen ist sie gallertig. Es möge gleich hinzugefügt werden, dass die dünnflüssige Endolympe der Kanäle 1,5% fester Stoffe enthielt, darunter wenig Schleim und kein Eiweiss.

Der Knochen des Felsenbeins zeichnet sich durch grosse Härte und Dichtigkeit vor anderen Knochen aus, jedoch der Knochenüberzug des Labyrinthes ist bei manchen Thieren *stellenweise* so schwach und verletzlich, dass man diese Härte nicht wohl als für das Gehör wichtig auffassen kann.

Eine der Oeffnungen der Knochenkapsel ist durch die Membrana tympani secundaria abgeschlossen. Dies ist eine eigenthümlich geformte, aus einer Membr. propria, äusserem und innerem Bindegewebsüberzug bestehende Membran. Nach WEBER LIEL¹⁰² liegt ihr Ansatz an dem tympanalen Rande der Fenestra rotunda, greift aber ausserdem weit nach dem ovalen Fenster hin aus, so dass er sich bis zum Anfang des häutigen Schneckenkanals erstreckt. Die

* J. BUDGE hat (Arch. f. d. ges. Physiol. IX. S. 460) versucht, den Stapedius in Beziehung zur Erhaltung des Gleichgewichts zu bringen, es muss dafür auf das Original verwiesen werden.

101 DÄNHARDT, Endolympe u. Perilymphe. Arbeit d. Kieler physiol. Instituts. S. 103.

102 WEBER LIEL, Z. Function d. runden Fensters. Centralbl. f. med. Wiss. No. 2. 1876 und Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. No. 1, 3 u. 4. 1876.

Membran buchtet sich tief in die Scala tympani hinein und liegt, wie dies in REICHERT's¹⁰³ Abbildungen gut gesehen wird, dem Schneckenkanal in ihrem hinteren Abschnitt so dicht an, dass ein nur $\frac{1}{10}$ mm. weiter Spalt zwischen ihr und der Membrana basilaris bestehen bleibt. Eine Spannung kommt der Membran nicht zu, doch ist sie nach WEBER-LIEL so tief eingezogen, dass sie nicht viel tiefer eingedrückt, dagegen nach Eröffnung des Labyrinths stark nach der Paukenhöhle zu vorgetrieben werden kann.

Nach dem Vorgang von JOH. MÜLLER ging früher die Ansicht dahin, dass die Membran den Schall direkt, namentlich zur Schnecke leiten könne. Der oft sonderbar getheilte Bau der Trommelhöhle mancher Thiere, bei denen die eine der beiden Höhlen allein für das runde Fenster bestimmt zu sein scheint, konnte in diesem Sinn gedeutet werden. Ferner schien das Experiment mit der sog. MÜLLER'schen Flasche dafür zu sprechen. In dieser sind drei mit Membranen versehene Oeffnungen angebracht, die eine, das Trommelfell, führt mittelst eines Stabes, der Columella, zu der Membran der zweiten Oeffnung, während die dritte, die Fenestra rotunda, nur mit Membran versehen ist. Der Schall ward nach MÜLLER vom Trommelfell aus durch die Columella dem Wasser, in welches die Flasche halb eingetaucht war, gut zugeführt, aber auch, wenn gleich weniger gut, durch die freie Membran. SCHMIDEKAM^(S) fand die Leitung auf letzterem Wege recht undeutlich; die ganze Einrichtung ist aber nur eine rohe Nachahmung der Verhältnisse des Gehörorgans. Die Ansicht hat überhaupt nur ein historisches Interesse, seitdem MACH und KESSEL⁶¹ wie S. 49 erwähnt, nachgewiesen haben, dass die Membr. secundaria von dem Steigbügel aus in Bewegung gesetzt wird und in vollständiger Abhängigkeit von der Bewegung der Gehörknöchelchen steht. Nur wenn deren Reihe unterbrochen worden ist, könnte von einer Zuleitung des Schalls durch die Fenestra rotunda die Rede sein.

Durch den Aquaeductus cochleae, einen engen Gang in der Scala tympani, dicht vor dem runden Fenster, wird der Perilymphe ein Ausgang aus dem knöchernen Labyrinth offengehalten. Der Aquaeductus mündet neben der Fossa jugularis und communicirt hier mit dem Subarachnoidalraum. Nachdem schon HUSCHKE¹⁰⁴ diesen Zusammenhang vermuthet hatte, ist durch WEBER-LIEL¹⁰⁵ beobachtet, dass man an frischen Präparaten von der äusseren Mündung des

103 REICHERT, Anatomie d. Gehörschnecke. Abhandl. d. Berliner Acad. 1864.

104 HUSCHKE, Beiträge z. Physiologie. S. 23. 1824.

105 WEBER-LIEL, Berliner klin. Wochenschr. 1877. No. 44.

Aquaeductus aus die Schnecke mit gefärbter Flüssigkeit füllen könne, wenn die Luft im äusseren Gehörgang wiederholt verdünnt wird. Jedesmal wurde dabei Flüssigkeit in die Schnecke hineingesogen. Es wird also jeder Druck im Labyrinth sich gegen den Flüssigkeitsdruck im Subarachnoidealraum allmählich ausgleichen.

I. Das häutige Labyrinth.

Halbcirkelförmige Kanäle, Otolithensäcke und häutiger Schneckenkanal bilden von der Perilymphe abgeschlossene Hohlräume mit bindegewebiger Wandung und innerer, von dem Ektoderm abstammender Epithelauskleidung. Das

Bindegewebe ist in der Structur dem Gewebe der Cornea ähnlich, doch wegen der Feinheit der Theile scheinbar weicher; es ist an der Crista acustica der Halbcirkelkanäle an den Maculis der Otolithensäcke und an den sog. HUSCHKE'schen Zähnen in der Schnecke verdickt und daher resistenter. Sehr dünn ist es an der REISSNER'schen Membran in der Schnecke, an der freien (der Fenestra ovalis zugekehrten) Fläche der Otolithensäcke und an der



Fig. 22. Schema des häutigen Labyrinths: *a* horizontaler, *b* vorderer, *c* hinterer vertikaler Bogengang mit Ampullen, *d* Crista acustica und deren Nerven *n*, *e* Aquaeductus vestibuli, mit seinen Schenkeln den Utriculus *e*, und Sacculus rotundus *f*, verbindend. Von letzterem geht der Canaliculus reuniens *g* zum häutigen Schneckenkanal *h*, dessen Radix sehr schmal ist, der aber bis zum Cupelblindsack *i* hin sich mehr und mehr erweitert. Der Schneckenerv *k* tritt überall an den, dem Centrum der Schneckenspirale zugekehrten Rand des Schneckenkanals gradenwegs heran, nur am Blindsack läuft er fast parallel mit dem Canal und lässt hier das Helicotrema *x* als Verbindungsweg zwischen tympanaler u. vestibulärer Fläche *d*. Schneckenkanals frei.

überhaupt modificirten Lamina basilaris der Schnecke; an dem Lig. spirale derselben ist es gelockert. Das häutige Labyrinth zerfällt in zwei scharf gesonderte Theile. Der eine, vordere, besteht aus Schneckenkanal und Sacculus, der hintere aus Utriculus und den Bogengängen. Nach BÖTTCHER'S¹⁰⁶ Entdeckung communiciren beide Theile mit Hülfe des häutigen Aquaeductus vestibuli, welcher mit je einem Schenkel in den Otolithensäcken entspringt und dann als Gang das Os petrosum durchsetzt, um in einem erweiterten Raum neben dem Sinus petrosus inf. zu enden. Bei niederen Wirbelthieren, so, nach WIEDERSHEIM¹⁰⁷, bei den Ascolobaten unter den Sauriern ist die, hier mit Kalkkrystallen ausgefüllte Höhlung bis an den Schul-

106 BÖTTCHER, Entwicklung u. Bau des Gehörlabyrinths. Act. Acad. Leopold. XXXV. S. 34.

107 WIEDERSHEIM, Z. Anat. u. Morphol. d. Phylloclactylus. Morpholog. Jahrb. I.

tergürtel hinunter zu verfolgen und bildet grosse Säcke, welche nach seiner Ansicht beim Hören functioniren.

Das häutige Labyrinth ist theils durch Bindegewebsstränge in der Perilymphe aufgehängt, theils durch lockere Nerven- und Gefässpolster von der Knochenwand isolirt. An einigen Orten ist jedoch die Anlagerung an den Knochen fester, so nach RÜDINGER¹⁰⁸ die der Halbcirkelkanäle an der convexen Seite der Knochenkanäle und die des Schneckenkanals. Für letzteren wird die engste Verbindung mit den Schädelknochen durch den Modiolus vermittelt; dieser besteht aber aus einem so bröckeligen und lockeren Knochengewebe, ist auch so wenig fest mit der knöchernen Labyrinthkapsel verbunden (wie Knochenschliffe erweisen), dass eine beschränkte Isolirung der Theile gegen Tonzuleitung durch die Kopfknochen nicht gerade unmöglich zu sein scheint.

Viele anatomische Details, welche durch fleissige Bearbeiter bekannt geworden sind, stehen zur Zeit noch ohne Beziehungen zu den physiologischen Functionen, wir müssen uns auf das, für letztere unmittelbar Wichtige beschränken.

Die halbcirkelförmigen Kanäle.

Die halbcirkelförmigen Kanäle liegen in drei nahezu senkrecht zu einander gestellten Ebenen; wir unterscheiden einen horizontalen, einen hinteren vertikalen oder sagittalen und einen vorderen vertikalen oder frontalen Bogengang. Die Länge der Kanäle beträgt etwa 22 mm.

Die Gänge sind von Pflasterepithel ausgekleidet, für welches Nerven noch nicht nachgewiesen sind; nur in der als Ampulle bezeichneten Erweiterung befindet sich ein starker Zweig des Acusticus. An dessen Eintrittsstelle bildet die knorpelige Wand des Kanals eine Falte, die Crista, innerhalb deren der Nerv verläuft, um aus ihr in das hier verdickte Epithel hineinzutreten. Die innere Oberfläche des Epithels der Crista ist von einem Walde feiner starrer Härchen bekleidet, deren Länge von M. SCHULTZE¹⁰⁹, dem Entdecker dieser Bildungen, zu 0,09 mm. angegeben wird, aber von denen er sagt „sie verlieren sich endlich in solcher Feinheit, dass das letzte Ende nicht genau bestimmt werden kann“. FR. EL. SCHULZE¹¹⁰

108 RÜDINGER, Das häutige Labyrinth in STRICKER's Lehre von den Geweben.

109 M. SCHULTZE, Ueb. d. Endigungsweise d. Hörnerven. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1858.

110 FR. EL. SCHULZE, Zur Kenntniss d. Endigungsweise d. Hörnerven. Arch. f. Anat. u. Physiol. S. 382. 1863.

beobachtete die Verhältnisse an lebenden Fischen und Amphibienlarven. Die Härchen, zwar nur bis 0,07 mm. lang, mit verdickter Basis entspringend, gingen mindestens bis zur Mitte des Ampullenlumens. HENSEN (9. S. 353) bestätigte diese Erfahrung für Fische und findet neuerdings ¹¹¹ an 12 bis 15 mm. langen *Gobius*, die Zahl der Härchen auf jeder Crista zu 480, deren Länge zu 0,06 mm.

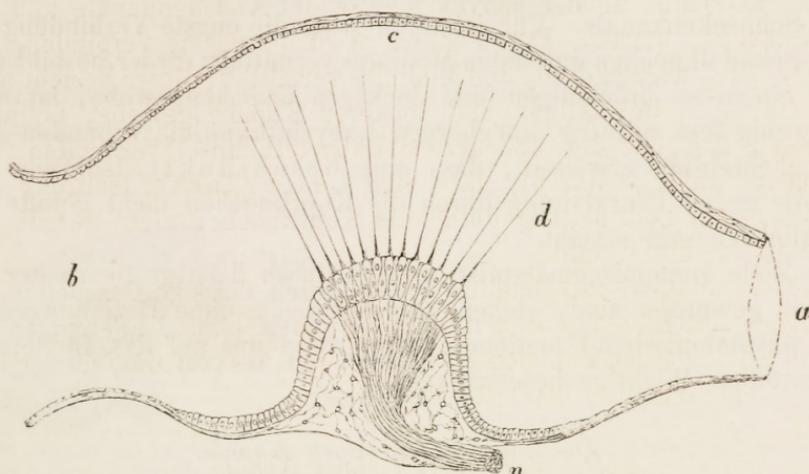


Fig. 23. Längsdurchschnitt einer Ampulle von *Gobius*, ohne Gewähr für die Form des Cristaepithels. *n* der Nerv, in das Bindegewebe der Crista eintretend. *a* Anhang des Kanals, *b* Eintrittsstelle der Ampulle in den Alveus communis, *c* das etwas cylindrische Epithel an der freien Wand der Ampulle, *d* die Härchen.

Von LANG ¹¹² ist gefunden worden, dass bei Cyprinoiden, nach Erhärtung mit Salpetersäure, sich ein schleimig häutiges Gebilde, die Cupula terminalis statt der Härchen auf der Crista finde, spätere Untersucher fanden kurze Härchen und eine Cupula, da jedoch HENSEN für *Gobius* nachgewiesen hat, dass die Cupula durch Reagentienwirkung aus den Härchen entsteht, dürfte vorläufig die Darstellung, von MAX SCHULTZE als richtig anzuerkennen sein.

In Bezug auf die Epithelien der Crista dürfte feststehen, dass die Härchen von cylindrischen Zellen aus entspringen und dass zwischen diesen Zellen andere, anscheinend indifferenten Natur liegen. Ueber die Art des Nervenendes gehen die Ansichten auseinander; dass die Nerven in die Epithellage hineingehen steht fest. Der Physiologe wird bis zur Einigung der Anatomen aus allgemeinen Gründen annehmen dürfen, dass die Nerven derart mit den Epithelien in Verbindung stehen, dass die Erschütterungen der Härchen auf sie einwirken.

111 HENSEN, Bemerk. gegen d. Cupula terminalis. Arch.f. Anat. u. (Physiol.) 1878.

112 LANG, D. Gehörorgan d. Cyprinoiden. Ztschr. f. wiss. Zool. XIII. S. 303. 1863.

Otolithensäcke.

Die Otolithen bestehen ^(101. S. 105) aus etwa 74,5 bis 77,5 % anorganischer Bestandtheile, darunter sehr überwiegend kohlenaurer Kalk in Crystallen. Daneben findet sich eine organische Masse, welche mit Schleim verglichen wird; durch letztere werden die Crystallmassen, in den Fällen, wo nicht Steine sondern Otokonie oder Otolithenstaub sich findet, sehr locker zusammengehalten; dies findet bei den höheren Wirbelthieren statt. An der Lagerungsstelle der Otolithen im Utriculus und Sacculus durchsetzen die Nerven an einem rundlichen Fleck (Macula acustica) die bindegewebige Wandung und treten in das hier verdickte Epithel ein. Die Zellen des letzteren tragen Härchen gleicher Art wie die der Crista, nur sind sie viel kürzer. Der Otolith wird von diesen Härchen getragen, so dass er von ihnen gehalten in der Endolymphe schwebt. Von dieser Thatsache kann man sich sehr leicht an durchsichtigen ganz jungen Fischen überzeugen, deren Otolithen sehr klar sind, und von relativ langen Härchen umfasst werden. Bei älteren Fischen (Fig. 24) liegt der Stein sehr dicht an der Wandung an, aber auch hier tragen ihn die Härchen, welche mit ihrer Spitze in einem Saum der die Otolithen zu umgeben scheint, eingehftet sind.

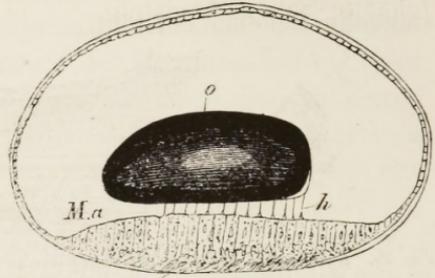


Fig. 24. Otolithensack von *Gobius* (Copie aus 9 Fig. 24). Die Härchen *h* stützen den excentrisch aufliegenden Otolithen *o*, welcher über der Macula acustica, *Ma* schwebend gehalten wird, *n* die Nerven der Macula im optischen Schrägschnitt.

Die Schnecke.

Dies complicirteste aller Gebilde des Ohrs zeigt sich bei den niederen Thieren in Bezug auf den Endapparat immerhin einfach gebaut. So ist nach HASSE'S ¹¹³ Untersuchungen in der Schnecke der Vögel das Epithel nicht erheblich von dem einer Macula acustica verschieden, nur dass auf ihm keine Otokonie, sondern eine membranöse Cuticularausscheidung liegt. Ein weiterer Unterschied ist, dass das Epithel auf der Membrana basilaris aufsitzt. Bei den Säugethieren liegen die Verhältnisse schwieriger, weil die Zellen sich weiter differenzirt haben.

Seit CORTI'S Untersuchungen ist über die Säugethierschnecke so viel gearbeitet worden, dass nicht daran zu denken ist, hier eine

113 HASSE, Schnecke d. Vögel. Ztschr. f. wiss. Zool. XVII.

Würdigung der Detailarbeiten unter denen diejenige von DEITERS¹¹⁴ besonders wichtig geworden ist, vorzunehmen. Ich werde mich bemühen auf Grund eigener Beobachtungen und Kritiken¹¹⁵ die Verhältnisse durch Hervorhebung des zur Zeit uns Wichtigen in einer für den Physiologen bestimmten Abkürzung darzustellen. Ich muss an dieser Darstellung auch den neuesten Untersuchungen gegenüber festhalten.

Die 2 $\frac{1}{2}$ Windungen der knöchernen Schnecke werden durch die Lamina spiralis in eine obere (eigentlich vordere), vestibulare und untere, tympanale Scala geschieden. Dies geschieht so, dass wenn man die Schnecke abgewickelt und dann der Länge nach, senkrecht auf die Lamina spiralis durchschnitten denkt, ein Bild wie das nachstehende Schema entsteht.

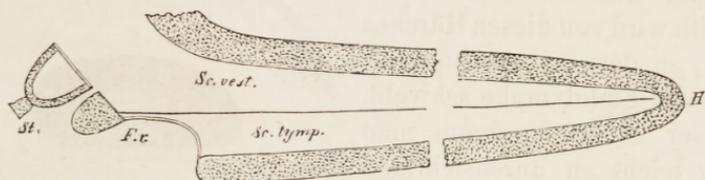


Fig. 25. Anfang und Endtheil der abgewickelten Schnecke im Längsschnitt. *Sc. vest.* Scala vestibuli. *Sc. tymp.* Scala tympani bei *H* das Helicotrema. *F.r.* Membrana tympani secundaria, dicht darüber der Durchschnitt der Lamina spiralis bis zum Helicotrema verlaufend. *St.* Stapes.

Durch die mit weiter Mündung beginnende Scala vestibuli kann man in die Scala tympani nur durch das Helicotrema gelangen. Die Lamina spiralis schliesst im übrigen die Scalen völlig von einander ab und legt sich auch dem Ende der Scala tympani, an der Fenestra rotunda abschliessend, vor. Die Lamina spiralis zerfällt in einen knöchernen Theil, der von der Axe, (Modiolus) der Schnecke seinen Ausgang nimmt und in einen häutigen, als Membrana basilaris bezeichneten, welcher die Fortsetzung des knöchernen bildet und sich an die Peripherie des knöchernen Schneckenkanals ansetzt. Diese Membrana bildet die eine (untere) Wand des im Querschnitt dreieckigen häutigen Schneckenkanals, auf ihr ruhen die Nervenenden. Sie befestigt sich nach aussen an einen verdickten, zu einem Bande entwickelten Streifen des Periost, das Ligamentum spirale, welches die äussere Wand des häutigen Kanals bildet. Auf der Oberfläche dieses Ligaments läuft ein mit Capillaren erfüllter Gewebstreifen, die Stria vascularis; derselbe dürfte functionell mit der Chorioidea des Auges zu vergleichen sein, während ein unter der Membrana

114 DEITERS, Lamina spiralis membr. Bonn, Cohen. 1860.

115 HENSEN, a) Zur Morpholog. d. Schnecke. Ztschr. f. wiss. Zool. XIII. S. 486. 1863. b) Kritiken u. neue Befunde. TRÖLTSCHE'S Arch. VI. S. 1. VII. S. 64. (1873.) VIII. S. 163. IX. S. 251.

basilaris hinziehendes Arterienstämmchen Fig. 26 A. v. s. mit der Arteria centralis retinae vergleichbar erscheint. Die obere Wand des Kanals wird durch die sehr feine Membr. Reisneri abgeschlossen.

Die der Schneckenaxe zugekehrte Spitze des dreieckigen Querschnitts ist unregelmässig gestaltet, weil eine schmale knorplige Leiste ins Innere vorspringt. Dieselbe liegt dem Rande der knöchernen Lamina spiralis auf und hat wegen ihrer eigenthümlichen Form und Schichtung den Namen der HUSCHKE'schen Zähne erhalten Fig. 26 A, z. Von den bisher genannten Gebilden hat die Membrana basilaris ein besonderes physiologisches Interesse, weil sie als der primär mitschwingende Theil scheint betrachtet werden zu müssen. Sie wächst nämlich von der Wurzel des Kanals an in Breite und zwar von 0,041 bis 0,495 mm. also von 1 auf 12 (während die Saiten eines Fortepianos von 1 auf 30 wachsen). Die Länge der Membran beträgt circa 33,5 mm., doch werden für beide Zahlen gewiss noch Schwankungen nicht unerheblicher Breite gefunden werden. Das Breitenwachsthum ist an der Wurzel des Schneckenkanals rasch, denn in der Strecke von 0,4 mm. verdoppelt sich die Breite. Weiter hinauf geht das Breitenwachsthum langsamer, auch an der Cuppel ist keine raschere Verbreiterung zu bemerken, doch wäre möglich, dass der hier etwas schräge Verlauf der gleich zu besprechenden Saiten der Membran den akustischen Effekt einer rascheren Verbreiterung hervorriefe, auch könnte durch die wachsende Belastung mit Epithel und Membrana Cortii eine tiefere Abstimmung des Theils herbeigeführt werden.

Die Basilmembran besteht aus 3 Lagen; dem häutigen Schneckenkanal zugekehrt findet sich eine Basalmembran *b'*, darunter liegt bei Säugern wie bei Vögeln eine einfache Lage im Querschnitt drehender Fasern, welche wegen der spiralen Krümmung des Kanals divergirend von der Lippe der Lamina ossea aus nach dem Lig. spirale hin verlaufen, jedoch erst jenseits des inneren Drittels der Membran so weit von einander getrennt liegen, dass sie als besondere Bildung, Streifung der „Zona pectinata“ leicht ins Auge fallen. Diese Fasern verlaufen ohne Theilung jede für sich und isoliren sich ziemlich leicht. Sie scheinen gleich dick von Anfang bis zur Insertion in dem Ligamentum spirale, sowie in den verschiedenen Theilen der Schnecke. Es kommen etwa vier dieser Seiten auf die Breite eines Bogens. Sie sind in eine glashelle Schicht eingebettet, welche auch noch unter ihnen als dritte Schicht *b'''* namentlich am äusseren Theil der Membran bemerkt wird. Ob diese Schicht so weich ist, dass sie die isolirte Schwingung der einzelnen Saiten nicht hindert, war nicht zu entscheiden.

Auf der Membran ruht die Papilla spiralis HUSCHKE, der Nervenendapparat. Derselbe ist an der Radix weniger wie 0,057 mm. breit und 0,06 mm. hoch, am Hamulus 0,195 mm. breit und 0,09 mm. hoch. Der Apparat wird durch zwei relativ starre Pfeiler *e* getragen,

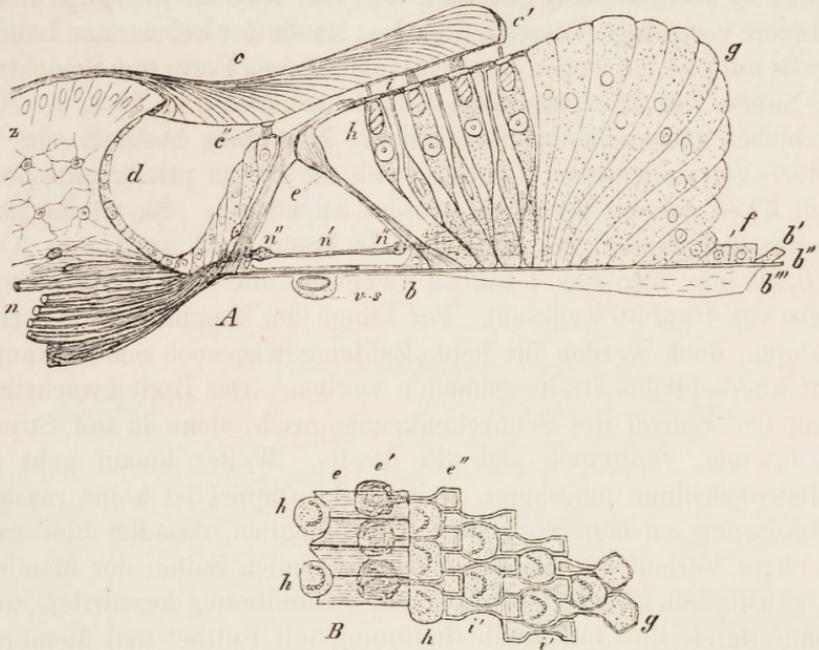


Fig. 26. A) Durchschnitt durch den Nervenendapparat der Schnecke. *z* dem häutigen Schneckenkana zugekehrter Theil eines Huschke'schen Zahns. *n* der Nerv, durch einen Spalt der Habenula perforata in das Epithel tretend, bei *n'* unter den Bogenfasern als markloser Faserzug weiter nach aussen ausstrahlend; bei *n''* sendet er behufs Plexusbildung Zweige senkrecht zur Ebene des Papiers ab. *v. s.* Vas spirale internum. *b* Membrana basilaris, *b'* Basementmembran, *b''* Saiten, *b'''* glashelles Gewebe unter denselben. *c* Membrana Cortii oder tectoria. *c'* verdickte Unterlage derselben, *c''* ebensolche Bildung von der Fläche als „höckerige Linie“ erscheinend. *d* Sulcus spiralis mit seinem Epithel. *e* innere und äussere Bogenfaser, die zu denselben gehörenden Zellen sieht man an ihrer Basis. *f* Epithel der Zona pectinata. *g* Stützzellen. *h* die Corti'schen oder Stäbchenzellen, der eigentliche Nervenendapparat. Von denselben gehen kurze Stäbchen aus, auf denen die Corti'sche Membran frei aufliegt; in diesen Zellen eigenthümliche, mit einem Spiralfaden unentwickelte Kapseln. Zwischen diesen Zellen bei *i* eine der Deiters'schen Haarzellen, gleichsam unentwickelte Bogenform repräsentirend. B) Die Strecke zwischen *c'* und *c''* von der Fläche gesehen. *h* die Stäbchenzellen von oben gesehen; die Stäbchen sieht man auf denselben als runde Kreise, welche sich so nebeneinander stellen, dass eine Hufeisenform dadurch gebildet wird. *e* ist die Platte der inneren, *e'* der Kopf der äusseren Bogenfaser. Dieser sendet einen flachen Fortsatz *e''* aus, welcher im Verein mit den sog. Phalangen *i, i'* die Lamina reticularis bildet, welche die Stäbchenzellen umrahmt und trägt. Die Phalangen sind m. E. nichts anderes, als die freien Endflächen der Haarzellen. *g* die innerste Stützfaser, welche etwas zur Bildung der Lamina reticularis mit beiträgt.

welchen sich nach aussen eine gefensterte Platte, die Lamina reticularis anschliesst, diese liegt nach aussen den Stützzellen an. Letztere werden nach dem Hamulus zu so zahlreich, dass man sie als Belastung der Membran auffassen möchte, doch spricht dagegen, dass sie bei Meerschweinchen mit Fett gefüllt sind.

Auf je zwei inneren Pfeilern sitzt eine Zelle, welche auf ihrer freien Fläche eine Reihe kurzer Stäbchen trägt, drei oder vier ähnliche Zellen sitzen in den Löchern der Membrana reticularis. Diese

sog. CORTI'schen Zellen sind als der eigentliche Endapparat des Nerven zu betrachten. Ihre Stäbchen sitzen auf einem etwas verdickten Membrantheil, darunter folgt eine Kapsel, die von einem Faden (Nerv?) spiral umwunden ist und die vielleicht als Tastapparat zu deuten wäre. Die Zelle läuft in einen Faden aus, der Neigung hat varikös zu werden. Die Stücke der Membrana reticularis hängen mit den sog. DEITERS'schen Haarzellen zusammen, deren Ende sie bilden. Die Pfeiler und die Membrana reticularis bilden die vielleicht bei starkem Druck nachgiebigen Träger der CORTI'schen Zellen.

Auf dem ganzen Apparat liegt, getragen von den Stäbchen der CORTI'schen Zellen eine ziemlich mächtige Cuticularbildung, die CORTI'sche Membran oder Membrana tectoria *c*. Diese Haut ist auf den HUSCHKE'schen Zähnen ziemlich gut befestigt, nach aussen hin aber sicher ohne Befestigung. Da die Spitzen zerrissener todtenstarrer Muskelfasern sich in sie eindrücken lassen, müssen wir sie als ein weiches Gebilde betrachten. Die den Stäbchen aufliegende Fläche derselben hat jedoch einen härteren Ueberzug *c'*, *c''*, welcher sich absprenge lässt und welcher, besonders markirt über der Reihe der inneren Stäbchenzellen, hier an der abgelösten Membran als höckerige Linie hervortritt.

Alle diese Verhältnisse machen anatomischerseits die Annahme wahrscheinlich, dass die Erregung durch Anstossen der Härchen gegen die Membrana tectoria, oder umgekehrt, erfolge.

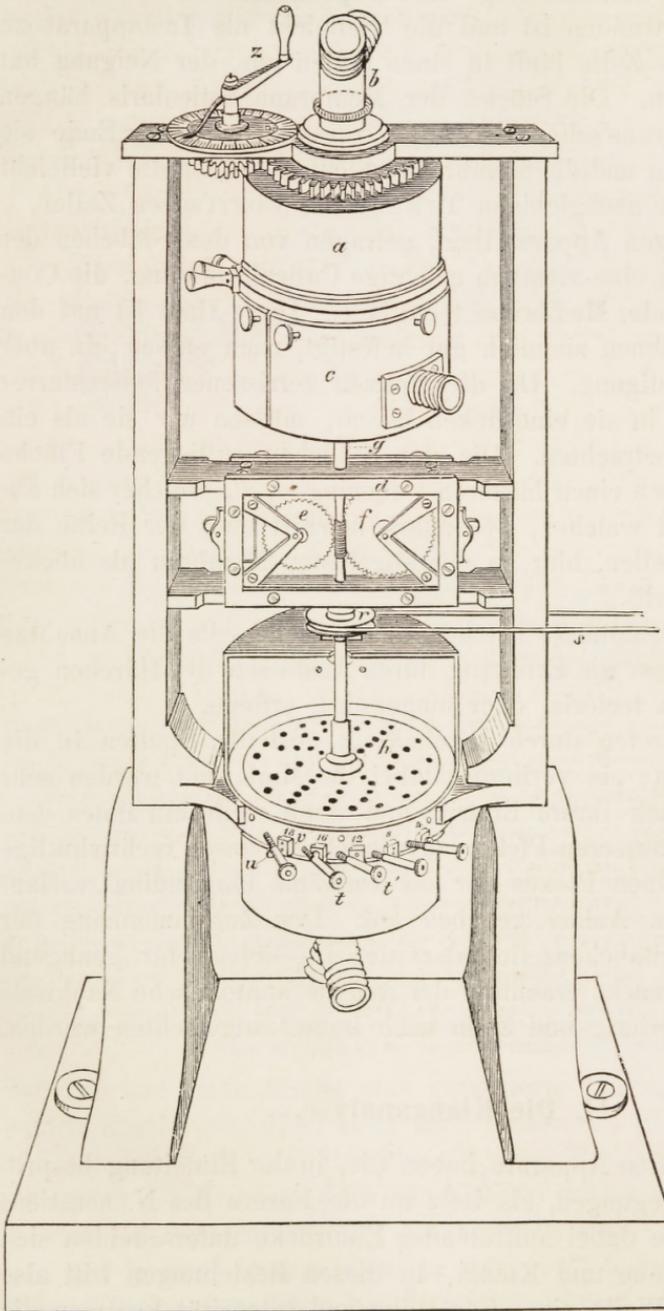
Die Nerven treten durch regelmässig gestellte Spalten in die Papilla spiralis ein; sie verlieren dabei ihr Mark und werden sehr fein. Sogleich nach ihrem Eintritt und dann weiterhin unter dem inneren und dem äusseren Pfeiler entwickeln sie durch rechtwinklige Anastomosen einen Plexus der zur Annahme longitudinal verlaufender Nerven den Anlass gegeben hat. Den Zusammenhang der Nerven mit den Stäbchenzellen darf der Physiologe für genügend wahrscheinlich gemacht erachten, der genaue anatomische Nachweis dafür ist sehr schwierig und kann noch immer angefochten werden.

II. Die Klanganalyse.

Die geschilderten Apparate haben die, in der Einleitung besprochenen Wellenbewegungen, als Reiz an die Fasern des N. acusticus zu übertragen. Die dabei auftretenden Eindrücke unterscheiden sich nach Intensität, Höhe und Klang. In diesen Beziehungen tritt also eine Analyse der Welle ein. Für Höhe und Intensität kommen die schon S. 37 besprochenen Gesetze des Mitschwingens in Betracht,

hier werden wir uns daher vorzüglich mit der Erklärung dessen, was unter Klang und Klanganalyse verstanden wird, und was physikali-

Fig. 27. Doppelsirene, eingerichtet zur Rotation durch Schnurlauf *s* und Rolle *r*. *a* oberer Sirenenkasten, frei um seine



kasten, frei um seine
Axe drehbar, mit Hülfe
des Zeigers *z*, der die
Drehung angeht. *b* Windrohr, durch
dessen einen Zweig die
Luft tritt, während aus
dem zweiten durch ein
Kautschukrohr die periodi-
schen Stöße aufs in-
tensivste anderen Gegen-
ständen zugeleitet wer-
den können. *c* Resonanz-
kasten über der rotiren-
den Scheibe, gleichfalls
mit einem Ableitungsrohr.
d Zählerwerk. *e* kleines
Rad, welches durch eine
Drehung der Schraube
an der Axe um einen Zahn
vorwärts bewegt wird.
f grosses Rad, welches
durch einen hier nicht
sichtbaren Vorsprung
nach einer vollen Rotation
des kleinen Rades um ein-
en Zahn vorwärts ge-
schoben wird. Dies er-
folgt nach je hundert
Drehungen der Axe *g* der
Sirenen Scheiben. *h* die
Sirenen Scheibe des unteren
Sirenenkastens, in der-
selben finden sich 5
Löcherreihen. Die inner-
ste Reihe enthält 4, die
äusserste 18 Löcher. Die-
se Löcher rotiren über
einer festen, genau in
gleicher Weise durchbohr-
ten Platte, welche hier
nicht sichtbar ist. Die
Löcherreihen dieser Platte
werden durch anein-
ander liegende, gleich-
falls durchbohrte, Ringe
für gewöhnlich ge-
schlossen, da die Lö-
cher der Ringe nicht un-
ter den Löchern in der
Platte liegen. Durch die
Stifte *t* können jedoch die
einzelnen Ringe so rotir-
t werden, dass ihre Löcher
unter diejenigen der fe-
sten Platte kommen, wo
dann die entsprechende
Lochreihe der rotiren-
den Sirenen Scheibe so
oft von Luft durchströmt
wird, wie ihre Löcher sich
über denjenigen der fe-
sten durchbohrten Schei-
be befinden. Dieses Öff-
nen der Löcher geschieht
durch Hineinschieben des
Stiftes *t*. Derselbe nimmt
dann die Stellung *u* an
und kann dauernd in die-
ser Stellung gehalten wer-
den, wenn der kleine Vor-
sprung *u* hinter den Klotz
v gelegt wird.

sche Untersuchungen darüber lehren, zu beschäftigen haben.

1. Die Klangfarbe und physikalische Klanganalyse.

Als man mit der Sirene genauer zu experimentiren anfangt, findet es sich, dass man in Fällen, wo zwar die *Anzahl* der Stösse in der Sekunde gleich, aber die *Art* des Stosses höchst verschieden war, denselben Ton wahrnahm. Es sind zum Zweck der Untersuchung dieser Verhältnisse sehr verschiedene Sirenen gebaut worden, doch leistet die von HELMHOLTZ construirte Doppelsirene, welche Fig. 27 nach einem von mir ein wenig modificirten Exemplar gezeichnet ist, alles Erforderliche.

Da die Luft nur von einer Seite durchgetrieben wird, fehlt scheinbar die negative Welle. Dieser Mangel trifft alle Löcherreihen in gleicher Weise, aber es wird die Bewegung der Luft, welche die Töne erzeugt nothwendig anders ausfallen müssen, wenn die Löcherreihe 4 einen Ton derselben Tonhöhe giebt wie die Löcherreihe 18. Da nämlich, wie man sieht, die Entfernung zwischen den Löchern dieser beiden Reihen sehr verschieden ist, so wird bei gleicher Tonhöhe die Unterbrechung des Luftstroms in der weiter auseinander stehenden Reihe 4 der Löcher einen grösseren Theil der Schwingungszeit T des Tones anhalten, als bei der Löcherreihe 18. Sollte dieser Unterschied der Luftbewegung für unser Ohr spurlos vorübergehen? OHM¹¹⁶ unterwarf den Gegenstand einer theoretischen Untersuchung. Er fragte sich nämlich, ob die Formeln für einfache Tonschwingungen (s. Formel I und II) auch Geltung haben für so complicirte Schwingungsformen, wie sie von einer Sirene gegeben werden können. Die Entscheidung fand er mit Hülfe des FOURIERschen Theorems, nach welchem jede Schwingungscurve sich mathematisch zerlegen lässt in Reihen von Sinus- und Cosinuscurven, die als Theiltöne aufzufassen sind. Bezeichnet also $F(t)$ irgend eine continuirliche oder discontinuirliche Function von t , der Zeit, welche ganz beliebige, jedoch reelle Werthe hat von $t = -l$ bis $t = l$, wo l die halbe Wellenlänge bedeutet, so ist zwischen diesen Grenzen

$$F(t) = A_0 + A_1 \cos \pi \frac{t}{l} + A_2 \cos \pi \frac{2t}{l} + A_3 \cos \pi \frac{3t}{l} \dots \dots \dots \\ + B_1 \sin \pi \frac{t}{l} + B_2 \sin \pi \frac{2t}{l} + B_3 \sin \pi \frac{3t}{l} \dots \dots \dots$$

Hierin sind A_0 , A_1 und B_1 , A_2 und B_2 u. s. w. lauter von t unabhängige Grössen, welche durch Rechnung zu finden sind. Der Ausdruck

$$A_1 \cos \pi \frac{t}{l} + B_1 \sin \pi \frac{t}{l} *$$

stellt den Grundton die zu $A_2 B_2$ gehörigen Werthe den 2. Theilton

116 OHM, Ann. d. Physik LIX. S. 513. LXII. S. 1.

* Der Ausdruck kann auch da $\cos \alpha = -\sin(\alpha - 90)$, geschrieben werden :

u. s. w. dar. Die bei den Stössen resultirende Luftbewegung mit Hülfe dieser Formel analysirt, ergab sich von solcher Form, dass je nach Lagerung der Löcher und Art des Anblasens (ob einseitig oder successiv von beiden Seiten) verschiedene Theiltöne und diese in verschiedener Stärke darin vorhanden sein müssen. Auf Grund dieser Untersuchung sprach OHM aus, dass, wenn unser Ohr nur einfache Sinusschwingungen als Ton auffasse, wir in dem Sirenton mehrere Töne erkennen müssten; sei letzteres nicht der Fall und sei für ein solches Unvermögen keine anderweite Erklärung zu gewinnen, so werde damit die Definition des Tons als Sinusschwingung als unrichtig erwiesen.

Dem entgegen fand SEEBECK⁽⁵²⁾ experimentell, dass die rechnungsmässigen Theiltöne zur Verstärkung des Grundtons mit beitragen und wenn überhaupt, nur verhältnissmässig schwach gehört würden. Er fand aber ferner, dass sie nicht nur den Grundton verstärkten, sondern auch auf den Charakter seines Klanges, welcher im Uebrigen der zu Grunde liegenden Bewegung nach, nicht bekannt sei, Einfluss übten.

So blieb die Sachlage seit 1849 stehen bis HELMHOLTZ⁽⁶⁾ den Gegenstand aufnahm. Er fand OHM's Voraussagen bestätigt, gab aber zugleich die Erklärung von SEEBECK's Befunden. Ein geübtes und aufmerksames, oder mit Resonatoren bewaffnetes Ohr, vermag nämlich in der That die einzelnen Theiltöne, wie sie nach den FOURIER'schen Reihen verlangt werden, zu unterscheiden, ein ungeübtes Ohr bemerkt sie jedoch nicht, sondern hat nur die Wahrnehmung eines Tons von besonderem Klang, je nach Beschaffenheit (Zahl, Lage und Intensität) der vorhandenen Theiltöne. Der Klang oder die besondere Färbung des Tons ist bedingt und ist ausschliesslich die Wirkung der, dem Grundton zugesellten Obertöne, je nach ihrer verschiedenen Zahl, Höhe und Intensität.

HELMHOLTZ hat diesen seinen wichtigen Befund eingehend empirisch begründet. Röhren, Hohlkugeln oder Hohleylinder wurden mit einer äusseren Oeffnung und einer zweiten Mündung, welche genau in den Gehörgang passte, versehen. Die Luft in diesen Apparaten kommt bei Angabe des Tons, welcher beim Anblasen der Röhre erhalten wird, durch Resonanz in starke Schwingung und wirkt entsprechend auf das Trommelfell ein. Man bezeichnet daher diese Apparate als Resonatoren. Sie resoniren für alle anderen Töne, namentlich für die harmonischen Obertöne gar nicht

$$B_1 \sin \pi \frac{t}{l} - A_1 \sin \left(\pi \frac{t}{l} - \frac{\pi}{2} \right)$$

woraus sich unter Berücksichtigung der Formel 7 ergibt, dass damit eine einfache Sinusschwingung ausgedrückt wird.

oder nur schwach, auch ist ihre Wirkung desto stärker und desto genauer umgrenzt, je enger ihre äussere Oeffnung ist. Man kann sich von diesen Resonatoren eine den Theiltönen eines Grundtons entsprechende Reihe darstellen und mit Hülfe derselben Klänge, die auf den betreffenden Grundton angegeben werden, analysiren. Das Resultat des Versuchs ergibt für jeden Klang eine entsprechend andere Zusammensetzung seiner Theiltöne, wie des Weiteren bei der Physiologie der Sprache auseinander gesetzt wird. In der Natur

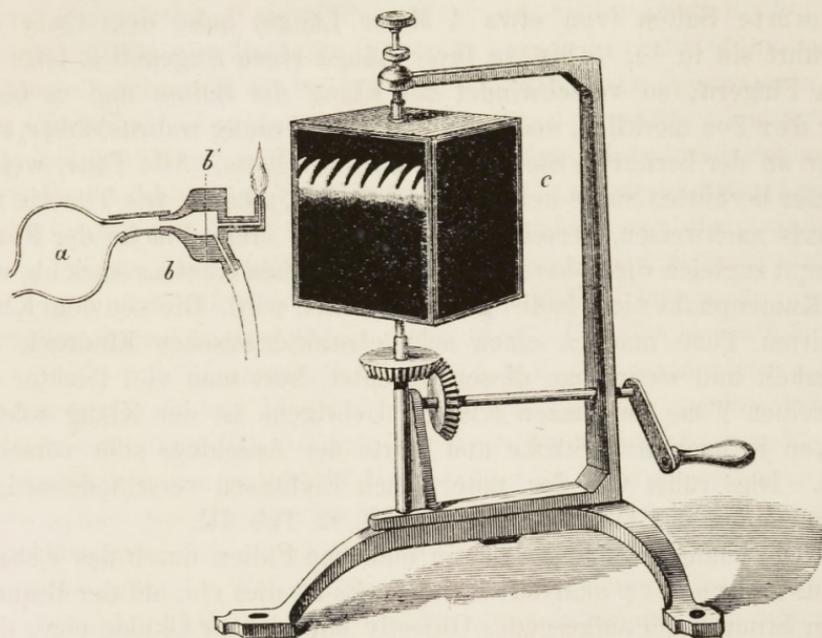


Fig. 28. *a* Resonator. *b* Kapsel nach KÖNIG, im Durchschnitt. Die Membran *b'* trennt die Luft von dem durchströmenden Leuchtgas, der Ton erschüttert dieselbe und setzt das Gas unter positiven oder negativen Ueberdruck. *c* Der rotirende Spiegel mit dem Flammenbild.

kommt nicht leicht ein Ton ohne Beitöne vor, selbst die Geräusche enthalten viele Töne.

Auch ohne das Ohr zu Hülfe zu nehmen, kann man mit Hülfe der Resonatoren die Zusammensetzung des Klangs aus Tonreihen demonstrieren. Wenn man nämlich an das, für den Gehörgang bestimmte Ende eines Resonators einen mit einer Membran überspannten Trichter ansetzt und auf die Membran leichte Körper bringt, so gerathen diese in Bewegung, sobald eine dem Eigenton des Apparats entsprechende Pendelschwingung in einer Klangbewegung vorkommt. Eleganter wird der Versuch, wenn man den Resonator mit einer Kapsel nach KÖNIG verbindet, deren Brenner anzündet und das Bild der Flamme in einem rotirenden Planspiegel beobachtet.

Man überzeugt sich, dass der Resonator stets eine einfache Sinus-

schwingung erzeugt, denn wenn die Kapsel direct angesprochen wird, gestaltet sich das Bild der Flamme sogleich weit complicirter.

Ohne Hilfsmittel wird ein Theilton am leichtesten gehört, wenn man auf dem Monochord zwei Saiten so nahe gleich stimmt, dass sie weniger wie eine Schwebung in der Secunde geben; reisst man ihre Mitte, so schlägt der 3. Theilton fast dreimal, der 4. fast viermal u. s. w. in der Secunde und das Ohr hört den laueren dieser schwebenden Theiltöne leicht heraus. Reisst man zwei gleichgestimmte Saiten (von etwa 1 Meter Länge) nahe dem Ende und berührt sie in $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{12}$ ihrer Länge einen Augenblick leise mit den Fingern, so verschwindet der Klang der Saiten und es bleibt nur der Ton merklich, und noch in der Entfernung wahrnehmbar, welcher an der berührten Stelle einen Knoten hatte. Alle Töne, welche an der berührten Stelle keinen Knoten haben, müssen, wie Theorie und Praxis nachweisen, verschwinden, aber die breite Fläche der Finger dämpft zugleich die höheren Theiltöne desselben Knotens stark ab, weil ihr Knotenpunkt nicht isolirt genug getroffen wird. Die von dem Klang isolirten Töne machen einen sehr charakteristischen Eindruck der Reinheit und wenn man diesen beachtet, hört man viel leichter die einzelnen Töne im ganzen Klang. Uebrigens ist der Klang solcher Saiten je nach Art, Stärke und Härte des Anschlags sehr verschieden. Dies rührt von der, unter jenen Einflüssen verschiedenartigen Beimengung der Obertöne her, vgl. S. 82 Tab. III.

Die Klangbewegung kann in manchen Fällen durch das Vibrationsmikroskop analysirt werden. Es ist dies ein, auf der Branche einer Stimmgabel aufgesetztes Objectiv oder besser Okular eines darüber resp. darunter senkrecht aufgestellten Mikroskops. Ist der Grundton eines schwingenden festen Körpers synchron mit den Schwingungen der Stimmgabel und ist die Richtung, in welcher letztere schwingt, parallel zur Ebene des schwingenden markirten Punktes, aber rechtwinklig gegen dessen Schwingungen, so bildet der Punkt eine Curve von in sich abgeschlossenem Verlauf. Diese Curve, die natürlich die Folge der rasch sich wiederholenden Ortsveränderungen des Punktes selbst und seines Bildes ist, scheint auf einer Cylinderfläche gezeichnet zu sein. Denkt man sie abgewickelt, so erhält man solche Curven, wie sie in der Einleitung gegeben worden sind. Die Anwendbarkeit dieser Art von Analysen ist jedoch beschränkt.

Eine fernere Möglichkeit der Klanganalyse bietet die phonographische Untersuchung. Dabei verzeichnet der schwingende Theil, meistens eine Membran, mit Hilfe eines Haares oder einer biegsamen Feder seine Schwingungen auf einem berussten Cylinder. Der bis-

her meistens gebrauchte SCOTT-KÖNIG'sche Phonautograph leidet sehr unter den Eigenschwingungen und der nothwendigen Abstimmung seiner Membran, da complicirte Toncurven nicht gut und richtig wiedergegeben werden. Dagegen geben Apparate mit starker Dämpfung, wie z. B. der EDDISSON'sche Phonograph, die Schwingungen weit richtiger, aber zugleich kleiner wieder, die Untersuchung der Curven desselben ist jedoch erst vor Kurzem in Angriff genommen worden.

Einen wichtigen Schritt in einer anderen Richtung haben wir wiederum HELMHOLTZ zu verdanken. Es ist demselben nämlich gelungen, gewisse Klänge aus einfachen Tönen zu componiren. Stimmgabeln haben sehr schwache harmonische Obertöne, und Resonatoren von Kugelform haben nur unharmonische Obertöne welche nicht mit denen, welche Stimmgabeln gleicher Abstimmung geben, übereinkommen.

Wenn daher eine Stimmgabel, unter Verhinderung der Leitung ihres Schalls auf feste Flächen, zum Schwingen gebracht und vor einen entsprechenden Resonator gestellt wird, so resonirt allein der Grundton; man hört ihn als leeren Ton und so klangfrei wie dies die Einrichtung unseres Ohres nur zulässt. Für den Versuch wurde eine Reihe von Stimmgabeln, welche auf die Töne einer zusammenhängenden Reihe von Theiltönen abgestimmt waren, vor Resonatoren gestellt und durch Elektromagneten in Schwingungen versetzt. Die Resonatoren konnten nach Willkür halb oder ganz geschlossen werden, so dass einzelne der Theiltöne ausfielen oder schwach oder stark gehört wurden. Es ergab sich das wichtige und beweisende Resultat, dass auf diese Weise Klänge (es wurden namentlich die Klänge der Vokale untersucht) nach Willkür *aus einfachsten Tönen erzeugt* werden können. Aehnlichen Erfolg hat APPUNN¹¹⁷ mit Hilfe von Zungenpfeifen gehabt.

Als Beispiel der Intensitäten der Theiltöne in einem Klang möge folgende, von HELMHOLTZ (6. S. 135) berechnete, Tabelle (S. 82) dienen. Dieselbe enthält in ihrer 3., 4. und 5. Columne die Klänge, welche ein Flügel in seinen tiefsten Tönen bis zur zweigestrichenen Octave giebt.

Die theoretische Intensität ist nicht strenge identisch mit der Intensität, welche der Ton für unsere Wahrnehmung hat, letztere wird für die Obertöne zum grösseren Theil höher wie hier angegeben, sein. Immerhin kann dies Beispiel als eine Annäherung betrachtet werden. Das Verschwinden des 7. Theiltöns rührt daher, dass der Hammer auf dessen Knotenpunkt trifft.

Nach den vorliegenden Erfahrungen sind die Klänge wie folgt zu charakterisiren.

117 Vgl. WOLF, Sprache und Ohr. S. 11. Braunschweig, Vieweg. 1871.

Theoretische Intensität der Partialtöne. (Tab. III.)

Anschlag in $\frac{1}{7}$ der Saitenlänge						
Ordnungs- zahl des Partialtons.	Anschlag durch Reissen	Anschlag durch den Hammer des Instru- ments, dessen Berührung dauert :				Anschlag mit einem ganz harten Hammer
		$\frac{3}{7}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{3}{14}$	$\frac{3}{20}$	
		von der Schwingungsdauer des Grundtons				
		c''	g'	$C_1 - c'$		
1	100	100	100	100	100	100
2	81,2	99,7	189,4	249	285,4	324,7
3	56,1	8,9	107,9	242,9	357,0	504,9
4	31,6	2,3	17,3	118,9	259,8	504,9
5	13,0	1,2	0,0	26,1	108,4	324,7
6	2,8	0,01	0,5	1,3	18,8	100,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

1) Klänge einfachster Töne (Stimmgabeln vor Resonatoren, weite, gedeckte Orgelpfeifen) sehr weich, angenehm und ohne Rauigkeiten, aber unkräftig und in der Tiefe dumpf.

2) Klänge mit Obertönen bis zum 6. hinauf, sie sind klangvoller und musikalischer. Dabei sind sie, so lange die höheren Obertöne fehlen, völlig wohllautend und weich, sowie reich und prächtig. (Fortepiano, offene Orgelpfeifen, Horn und weichere Töne der menschlichen Stimme.)

3) Wenn nur ungradzahlige Theiltöne da sind, wird der Klang hohl, bei grösserer Zahl von Obertönen näselnd und je nach Ueberwiegen des Grundtons voller oder leerer. (In der Mitte angeschlagene Saiten, Clarinette, enge gedeckte Orgelpfeifen.)

4) Wenn die höheren Theiltöne jenseits des 7. sehr deutlich sind, wird der Klang scharf und rau. Die Rauigkeiten werden verursacht durch Dissonanzen zwischen den zu eng liegenden Obertönen. Diesen Klangcharakter haben in mehr oder weniger ausgeprägter Weise die Streichinstrumente, die meisten Zungenpfeifen, Oboe, Fagott, Physharmonica und menschliche Stimme. Sehr kräftig wirken Trompeten und andere „schmetternd“ klingende Blechinstrumente. Bei denselben dürften viele dissonirende Obertöne auftreten.

2. Wirkung der Phasenverschiebungen.

Wenn in der Reihe der Theiltöne sich Phasenunterschiede einstellen, also die Curve die Formel hat

$$y = a \sin 2 \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\mu}{\lambda} \right) + b \sin 4 \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\nu}{\lambda} \right) \dots \dots \dots$$

so complicirt sich die Form der Gesamtbewegung ausserordentlich. Es fragt sich ob die Aenderung, welche eine Klangbewegung durch Phasenverschiebung erleidet, auf unser Ohr einen Eindruck irgend welcher Art macht. Man sollte denken, dass dies der Fall sein müsse.

Zur Entscheidung der Frage benutzte HELMHOLTZ seinen, S. 81 beschriebenen, Resonatorenapparat. Die mathematische Untersuchung ergibt, dass bei jeder Verstimmung eines Resonators seine Resonanz gegen den zugehörigen Ton nicht nur geschwächt wird, sondern dass zugleich die Phase der Schwingung, welche von dem Resonator ausgehend unser Ohr trifft, sich ändert.

Bei tieferer Abstimmung des Resonators tritt die Phase der grösssten Geschwindigkeit etwas früher ein, wie diejenige, der vor dem Resonator schwingenden Gabel, bei höherer Abstimmung tritt sie später ein. Da die Stimmgabeln alle in gleichen Phasen schwingen, weil sie durch den, von einer Unterbrechungsgabel, welche nach ähnlichem Princip wie der NEEF'sche Hammer den Strom schliesst und unterbricht, geregelten galvanischen Strom ihre regelmässigen Anstösse erhalten, sind wir auch der Unveränderlichkeit ihrer Phasen sicher. Man hat durch Verengung (Deckung) der Mündung eines Resonators, welches Verfahren diesen tiefer stimmt, die Möglichkeit in der Hand einen Theilton zu schwächen und zugleich in seiner Phase zu verschieben. Man kann aber auch durch Entfernung der Gabel vom Resonator den Ton nur schwächen ohne dabei die Phase merklich zu verändern. Die Combination beider Verfahrensweisen lässt die Phasenverschiebung abstrahiren.

Die nach diesem Verfahren von HELMHOLTZ ⁽⁶⁾ angestellten Versuche ergaben ihm, dass die Klangfarbe des musikalischen Theils eines Klangs nur abhängt von der Zahl und Stärke der Theiltöne, nicht von ihren Phasenunterschieden, welche einen wahrnehmbaren akustischen Effekt nicht geben.

Dieselbe Erfahrung macht man, wenn zwei mit Spiegeln versehene Stimmgabeln nach LISSAJOUS' ¹¹⁸ Methode durch das Auge auf ihre Schwingungen controllirt werden. Man sieht den, in beiden gespiegelten Leuchtpunkt allmählich die verschiedenen Formen durchlaufen, welche den Phasenunterschieden der beiden Stimmgabeln entsprechen, man hört aber keine, diesen Phasendifferenzen entsprechende Aenderung des Klangs, sondern hört, bei genügend raschem Wechsel, nur die durch Interferenz hervorgerufene Schwebung.

118 LISSAJOUS, Ann. d. Chemie. 3. Ser. LI. S. 147.

Wenn man eine Reihe von drei oder mehr Theiltönen auf eine KÖNIG'Sche Kapsel vor rotirendem Spiegel einwirken lässt, macht man die gleiche Erfahrung. Man kann den Ton von den Knotenpunkten gut gestimmter Orgelpfeifen nehmen, da die Abstimmung derselben weder genau genug zu machen ist, noch genau genug bleibt, um Phasenverschiebungen während des Versuchs auszuschliessen, oder man kann die Töne von dem Windkasten der Doppelt sirene nehmen und die obere Sirene drehen. Das Ohr bemerkt bei dem Versuch keine Aenderung der Klangfarbe, während das Auge gleichzeitig die auffallendsten Veränderungen des Flammenbildes vor sich gehen sieht. Diese Beobachtungen beziehen sich nur auf die 8 bis 9 ersten Theiltöne eines Klages, es ist nicht unmöglich, dass bei den höheren Theiltönen Phasenverschiebungen für den Klang von Bedeutung werden, namentlich deshalb, weil diese Töne so dicht liegen, dass sie sich dabei sehr verstärken, oder auch gegenseitig auslöschen können.

Das wichtigste Resultat dieser Untersuchungen bleibt nichts destoweniger bestehen, dass nämlich unser Ohr ungleich dem Auge, nicht die Form der Schwingungen als solche empfindet, sondern sie in die einzelnen Sinusschwingungen, aus denen sie resultirt, zerlegt. Ob das Maximum der einen oder anderen dieser einzelnen Schwingungen ein wenig früher oder später innerhalb der Periode des Grundtons liegt, wird nicht direct empfunden.

3. Empfindung der Schwebungen.

Wir haben S. 12 gesehen, dass bei Phasenverschiebung zweier gleichen Töne die Bewegung sich zu einer einfachen Sinuscurve mit einer Amplitude zwischen 0 und der Summe der Amplituden beider Töne, combinirt. Die so entstehende Curve bietet weder für unser Ohr, noch für die mathematische Analyse, Anhalt zu weiterer Zergliederung. Sobald jedoch zwei verschiedene Töne sich nach Intensität und Tonhöhe so nahe stehen, dass die Bewegung *zeitweilig* fast ausgelöscht werden kann, tritt ein zweifaches ein.

Einmal stellt sich ein Schwanken in der Tonhöhe, der sog. RADAU'Sche Variationston, ein.* Dabei liegt im Maximum der Tonstärke die Tonhöhe *zwischen* derjenigen der beiden Töne, von denen

* Sei die Geschwindigkeit der Bewegung

$$v = A \sin (Mt) + B \sin (Nt + c)$$

wobei $A > B$, so wird nach HELMHOLTZ (5. Beil. XIV) die Schwingungszahl

$$\begin{array}{l} \text{im Maximum} \\ \text{im Minimum} \end{array} \quad \begin{array}{l} M - \frac{(M-N)B}{A+B} = N + \frac{(M-N)A}{A+B} \\ M + \frac{(M-N)B}{A-B} = N + \frac{(M-N)A}{A-B} \end{array}$$

wir den niederen N und den höheren M nennen wollen, beim Minimum ist sie *höher* wie M , wenn dies der stärkere Ton ist, dagegen *niederer* als N , wenn N stärker ist.

Zweitens werden die Maxima als Tonstösse oder Schläge, die Minima als Tonpausen sehr deutlich gehört. Hier wird also neben der etwa vorhandenen klanganalytischen Thätigkeit noch eine zweite Empfindung im Ohr erzeugt; es bleibt jedoch die Frage noch offen, ob hier wirklich eine zweite Art der Reaction unseres Ohrs vorliege.

Man war längere Zeit geneigt sich der Ansicht von THOMAS YOUNG anzuschliessen, nach welcher sich die, durch Schwebungen verursachten Stösse, ähnlich wie die Luftstösse der Sirene zu der Empfindung eines Tons zusammensetzen, wenn sie sich so rasch folgen, als zur Bildung eines wahrnehmbaren Tons erforderlich ist. In der That hört man in diesem Falle Töne (die sog. Combinationstöne und Stosstöne, KÖNIG), unter denen die leichter hörbaren sich ihrer Schwingungszahl nach so verhalten, wie YOUNG'S Ansicht dies verlangt. Wenn also zwei Töne von z. B. 1000 und 1044 Schwingungen gleichzeitig angegeben werden, so kommen ihre Wellen 44 mal in der Sekunde zur Deckung und ebenso oft zur Interferenz, geben also 44 Schwebungen und man hört zugleich den Ton F (44 Schwingungen). Dennoch kann die Ansicht von YOUNG nicht in voller Ausdehnung für richtig erklärt werden.

Das Trommelfell macht nämlich, wie POLITZER experimentell erwiesen hat, die Curve der Schwebungen genau mit. Ein Theilchen desselben würde also bei den Schwebungen sich etwa so bewegen, wie die nachfolgende Curve zeigt.

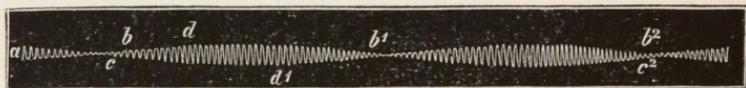


Fig. 29. Sei a die Ruhelage, so wird das Trommelfell im Verlauf einer Schwebung die, etwa 44 Schwingungen zwischen b und b' vollziehen, aber nicht, wie man nach dem akustischen Eindruck zu glauben geneigt ist, eine Nebenbewegung in Form der Welle des Differenztons, also $b d d' b'$ mit dem Maximum oder Minimum bei d resp. d' , oder auch eine Wellenbewegung $b a b' c^2$ resp. $c d' b' b^2$ vollführen.

Ein wirklicher Tonstoss von der Wellenlänge des ersten Differenztons würde sich als Sinuscurve $c d d' b'$ der vorhandenen Bewegung zuaddiren müssen, davon ist aber in der vorliegenden Curve gar nichts zu bemerken. So ist also die genauere Betrachtung einer Schwebungcurve der Ansicht von YOUNG nicht günstig!

Ausserdem ist sicher gestellt, dass 40 und weniger Luftstösse,

welche unser Trommelfell treffen, als Ton zur Wahrnehmung kommen, während nach HELMHOLTZ 130 Schwebungen und den Schwebungen ähnliche Tonstösse noch als solche empfunden werden.

Um recht deutliche Schwebungen zu erhalten, ist es nöthig 1) die beiden interferirenden Töne gleich stark zu machen, damit sie sich völlig auslöschen können, 2) die Tonintervalle klein zu nehmen, damit die interferirenden Wellen sich möglichst vollständig decken. Das Intervall eines halben Tons erfüllt letztere Bedingung genügend. Nehmen wir das Intervall hc' (247,5 und 264 Schwingungen) so erhalten wir $16\frac{1}{2}$ Schwebungen in der Sekunde, $h'c''$ giebt 33 $h''c'''$ 66, $h'''c^{IV}$ 132 Schwebungen. Beobachtet man diese Reihe an passenden Toninstrumenten, etwa an Orgelpfeifen, so verschwindet zwar schon unter 16 Schwebungen die Möglichkeit der gesonderten Wahrnehmung der Stösse, aber den Tönen bleibt ein Rollen, Schnarren und eine charakteristische Rauigkeit anhaften, welche noch unzweifelhaft bei 132 Schwebungen besteht, obgleich sie hier unmerklich zu werden beginnt.

Wenn zwei Sekundenpendel zusammenschlagen, kann das Ohr bis zu nahe $\frac{1}{100}''$ bestimmen, ob ihre Schläge zusammentreffen oder nicht. Man kann auch eine Zungenpfeife hohen Tons in den Windkasten einer Sirene bringen und von dort anblasen. Wenn dann eine Löcherreihe geöffnet wird, trifft der Ton nur dann das Ohr, wenn die Oeffnung der Scheibe die Löcherreihe passirt. Dabei wird dieser künstlich unterbrochene Ton ebenso rau und knarrend, wie rasch schwebende Töne, und kann als solcher weit über die Grenzen der Anzahl von Tonstössen, welche für die Bildung eines tiefen Tons erforderlich sind, wahrgenommen werden.

Somit ist es sicher, dass die Schwebungen als solche sich nicht in einen Ton verwandeln können. Es wurde bereits S. 46 besprochen, dass und weshalb bei genügender Tonstärke unter den in Rede stehenden Verhältnissen Combinationstöne entstehen, neuerdings hat KÖNIG¹¹⁹ nachgewiesen, dass dabei noch in anderer Weise Töne, welche er als Stosstöne bezeichnet, auftreten, auch DENNERT¹²⁰ machte ähnliche Befunde. KÖNIG experimentirte mit sehr starken Stimmgabeln vor Resonatoren und schloss demnach (vgl. S. 81) die objectiven Obertöne aus. Er fand, abweichend von früheren Beobachtern, dass noch weit grössere Intervalle als man früher annahm, Intervalle von 1:8 und selbst 1:10, Stösse geben können. Diese Stösse lassen sich nach KÖNIG weder aus den Theiltönen, noch aus den

119 KÖNIG, Ann. d. Physik. XLVII. S. 177. 1876.

120 DENNERT, Arch. f. Ohrenheilkunde. XII. S. 191.

Combinationstönen erklären, da solche auszuschliessen sind. Es werden z. B. bei der Combination des Tons von 64 und 510 Schwingungen 2 Stösse gehört. Um diese aus dem Differenzton zu erklären, haben wir $510 - 64 = 446$ v. d. 1. Differenzton, $446 - 64 = 382$ v. d. 2. D.-T., $382 - 64 = 318$ v. d. 3. D.-T., $318 - 64 = 254$ v. d. 4. D.-T., $254 - 64 = 190$ v. d. 5. D.-T., $190 - 64 = 126$ v. d. 6. D.-T., $126 - 64 = 62$ Schwingungen, 7. Differenzton, welcher 2 Schläge mit dem Grundton 64 v. d. giebt. Eine solche Reihe von Differenztönen ist kaum glaublich, auch muss der Ton 510 eine so geringe Intensität haben, wenn die Schläge am deutlichsten werden sollen, dass er sich zur Hervorbringung von Combinationstönen wenig eignet; endlich ist von allen jenen Differenztönen *nichts* zu hören.

Das Resultat von KÖNIG's ausführlichen Untersuchungen ist, dass die Anzahl der Stösse zweier Töne n und n' gleich dem positiven und „negativen“ Rest der Division $\frac{n'}{n}$ ist, d. h. gleich den Zahlen m und m' , die man erhält, indem man: $n' = hn + m = (h + 1)n - m'$ sagt, wo h der Quotient der Division ist, welche den Rest m er giebt. Die Sache verhält sich folglich so, als wenn die Stösse von *denjenigen* zwei Obertönen h u. $h + 1$ des tiefen Tons n herrühren, zwischen welche der höhere Ton n' fällt, die stärkeren Schläge rühren dann von dem n' näher gelegenen der beiden Obertöne her. Sowohl die Stösse m als auch diejenigen m' gehen bei genügender Intensität der primären Töne und hinreichender Anzahl, in Stosstöne über. Auch Intermittenzen eines Tones können in einen Ton übergehen, wie mit Hilfe einer Sirene und einer unter der Sirenenscheibe tönenden Stimmgabel gezeigt wird. Man hört einen Ton, welcher so viel Mal schwingt, wie die Löcher die Stimmgabel passiren, so lange nur der Ton der Stimmgabel höher ist, als der Sirenenton. Die Combinationstöne sind viel schwächer, als die Stosstöne.

Diese Resultate scheinen denjenigen von HELMHOLTZ zu widersprechen, jedoch es ist als ein wesentlicher Umstand zu berücksichtigen, dass die Schwebungen sich nicht völlig in einen Stosston umwandeln können, sondern dass stets, und zwar wie es scheint sehr laut, die knarrenden Geräusche den Ton begleiten. Es lösen sich also die Stösse nur theilweise in Töne auf. Die Stosstöne sind wichtig für die später zu besprechende musikalische Theorie, hier ist nur hervorzuheben, dass die Stossbewegung, in einer noch nicht ganz durchsichtigen Weise wohl eine Sinusschwingung der Tongeschwindigkeit m und m' , sei es in der Luft, sei es im Gehörapparat, mit hervorbringt. Der für uns

wichtige Satz, dass die Schwebungen an sich als Geräusche bemerkt und als solche bis zu 130 Stößen in der Sekunde wahrgenommen werden, bleibt unverändert bestehen.*

4. Kleinste Anzahl der als Geräusch oder Ton wahrnehmbaren Tonschwingungen.

Nur bei einer gewissen Anzahl sich folgender Schwingungen kommt ein Ton als solcher zur Wahrnehmung. MACH¹²¹ brachte ein Toninstrument in einen tondicht geschlossenen Kasten und leitete den Ton durch ein Rohr einerseits an eine KÖNIG'sche Kapsel mit Brenner, andererseits bis nahe an das Ohr des Beobachters. Von letzterem wurde aber das Rohr durch eine Pappscheibe getrennt. Diese Scheibe war drehbar und wurde mit einem radialen Ausschnitt von veränderlicher Winkelbreite versehen. Sie trug an diesem Ausschnitt einen Spiegel, welcher das Bild des Brenners zu sehen erlaubte so lange der Ausschnitt am Kopfe vorbeiging. Es wurde dafür gesorgt, dass man durch diesen Ausschnitt gleich viel Schwingungen sah und hörte. Die Versuche ergaben, dass erst bei 4 bis 5 Schwingungen ein Ton von bestimmter Höhe erkennbar wurde, bei 2 bis 3 Schwingungen hörte man nur einen trocknen Schlag. KÖNIG⁽¹¹⁹⁾ liess den Ton eines Instrumentes durch die Löcherreihe der Sirene gehen und kam dabei zu ähnlichen Resultaten.

EXNER¹²² führte den Ton aus einem Resonator mit Hilfe eines

* PREYER⁽⁵⁾ hat die Untersuchungen von KÖNIG aufgenommen, im Wesentlichen bestätigt und näher analysirt. HELMHOLTZ war zur Erklärung der Klangwahrnehmung und somit der Erkenntniss der physikalischen Einrichtung unseres Labyrinths auf dem Wege gelangt, dass er die Ansicht von THOMAS YOUNG, die Combinationstöne seien Stosstöne, widerlegte. PREYER sieht sich veranlasst, die Combinationstöne wieder als Stosstöne zu bezeichnen. Er findet nämlich, dass die drei Gründe, welche HELMHOLTZ für seine Ansicht geltend machte, nicht mehr haltbar seien. Diese Gründe waren, dass 1) die Summationstöne nicht aus Stößen entstehen können; 2) die Combinationstöne unabhängig vom Ohr existiren könnten; 3) jene Ansicht nicht vereinbar sei mit dem, durch sonstige Erfahrungen bestätigten Gesetz, dem zufolge das Ohr (Schnecke) nur diejenigen Töne empfindet, welche einfachen pendelartigen Schwingungen der Luft entsprechen.

Indem PREYER so auf YOUNG zurückgreift, gewinnt es den, wie ich glaube nicht beabsichtigten, Anschein, als wenn die Klanganalyse des Ohrs dabei in Frage gestellt würde. Wir können jedoch von dem Labyrinth nur verlangen, dass es die Klangbewegung analysire, welche das *Trommelfell* ihm bringt, und den Bau des letzteren haben wir nunmehr als so eigenartig erkannt, dass sich mit hoher Wahrscheinlichkeit behaupten lässt, es sei ihm eigenthümlich, eine Quote der Intensitätsschwankungen (vgl. Fig. 29) in Wellen der Combinationstöne umzuwandeln. Uebrigens ist nicht zuzugeben, dass Combinationstöne nicht objectiv nachzuweisen seien. KÖNIG⁽¹¹⁹⁾ hat die Stimmgabeln, welche Stosstöne geben, schreiben lassen, und da zeigen die Curven der paaren Theiltöne unzweideutig Tonwellen der Differenztöne, die folglich auch in der Luftbewegung vorhanden sein müssen; ob alle, lässt sich wegen der ungleichmässigen Schrift der abschwingenden Gabeln nicht erkennen.

121 MACH, Physikalische Notizen. Lotos, August 1873.

122 EXNER, Arch. d. ges. Physiol. XIII. S. 228.

Kautschukschlauchs dem in einem anderen Zimmer sitzenden Beobachter zu. Der Schlauch wurde durch einen, in seiner Bewegung genau registrirten Hebel, während gemessener Zeiten geöffnet. Die Untersuchung wurde mit Tönen von 128 und 64 v. d. angestellt. Der erstere Ton brauchte 16,9—17, der letztere 16,8 v. d. um als Ton gehört zu werden. Das Maximum der Intensität wurde erst bei 38 bis 51 Schwingungen gehört. Diese Zeiten sind auffallend lang.

Denselben Gegenstand haben v. KRIES und AUERBACH¹²³ in mühsamer Untersuchung verfolgt. Sie bestimmten mit Hülfe eines elektromagnetischen Registrirapparates die Zeit der psychophysischen Vorgänge. Jenes Kapitel ist in diesem Abschnitt der Physiologie nicht abzuhandeln, jedoch mögen hier die das Ohr betreffenden Ergebnisse kurz mit erwähnt sein.

Es lässt sich die Zeit bestimmen, welche zur einfachen Registrierung eines Gehöreindrucks gebraucht wird, in diesem Zeitabschnitt sind zusammengefasst die Vorgänge der Schallleitung, der Nerven-erregung im Labyrinth, Leitung in der sensiblen Nervenbahn, Prozesse in den Ganglien, Leitung in den motorischen Nerven, Stadium der latenten Reizung und Anfang der Muskelcontraction.

Die sehr geübten Beobachter erhielten als Mittel bei Reaction auf den Knall des Inductionsfunken

AUERBACH	0,122	Sekunden
KRIES	0,120	„

frühere Beobachter bei verschiedenen akustischen Signalen

HIRSCH	0,149	Sekunden
HANKEL	0,151	„
DONDERS	0,180	„
v. WITTICH	0,182	„
WUNDT	0,128	„
EXNER	0,136	„

Wenn das Signal erst gegeben werden durfte, nachdem unterschieden war, ob ein Geräusch (Knall) ein höherer (c. 640 v. d.) mittlerer oder tieferer (c. 400 v. d.) Ton angegeben worden, der Schall also analysirt worden war, fielen die Zeiten länger aus, als Mittel einiger Versuche um 0,023 und 0,046 Sek. länger. Die einfachen Reactionszeiten stellten sich dabei wie folgt:

	Funke	hoher Ton	mittl. Ton	tiefer Ton*
AUERBACH	0,198''	0,215''	0,227''	0,236''
KRIES	0,194	0,208	0,236	0,237

123 v. KRIES u. AUERBACH, Arch. f. (Anat.) u. Physiol. 1877. S. 297.

* Es handelt sich hier um leise Töne und wahrscheinlich auch um schwache Inductionsfunken, da starke Funken von den Beobachtern rascher gehört wurden. Die gegebenen Versuchswerthe sind von mir in Sekunden umgerechnet worden.

Es scheint demnach das Geräusch etwas rascher gehört zu werden. Das Erkennen möglichst einfacher Töne dauert bei A. 0,019—0,034 Sek., bei K. 0,049—0,053 Sek.

Unter Reserve wegen der Complication der Versuche kommen die Verfasser zu der Vorstellung, dass 9 bis 10 Schwingungen gewisser Intensität stattfinden müssen um eine Erregung zunächst noch unbestimmten Charakters auszulösen, eine weitere Anzahl von 10 Schwingungen ist erforderlich um den Ton zu erkennen.

Es ist hier noch einer Arbeit von PFAUNDLER¹²⁴ zu gedenken. Derselbe fand mit Hülfe eigenthümlicher, im Original zu vergleichender Anordnung der Löcher und der Anblaseröhren einer Sirenscheibe, dass im Minimum zwei Schallimpulse genügen können um die Empfindung eines Tons hervorzurufen, doch hält er seine Versuche wegen der Unreinheit der Sirenentöne für nicht ganz einwurfsfrei.

Man sieht dass die Entscheidung über die vorliegende Frage noch suspendirt werden muss.

III. Ableitung der physischen Einrichtung des Labyrinths.

Die mitgetheilten Erfahrungen über die Leistungen des Ohrs dienten HELMHOLTZ dazu, den für unsere Hörempfindung stattfindenden Mechanismus und die Anforderungen, welche an die anatomischen Theile gestellt werden müssen, zu formuliren. Da das Ohr nicht im Stande ist einen Wechsel der Schwingungsform, wie solcher bei Phasenverschiebungen erfolgt, zu unterscheiden, was bei entsprechenden graphischen oder Relief-Darstellungen dem Auge und dem Tastgefühl leicht ist, dürfen wir im Ohr nicht einen eigentlichen Tastapparat erwarten. Dagegen vermag das Ohr, was das Auge nicht unmittelbar kann, die Klangfigur in die einzelnen Theiltöne zu zerlegen. Wenn wir uns in der Natur nach Analogien für solche Zerlegung zusammengesetzter periodischer Bewegungen in Reihen von Sinusschwingungen umsehen, so finden wir keinen anderen Vorgang als die Erscheinung des Mitschwingens. Hierbei sind natürlich nur feste Körper in Betracht zu ziehen. Eine genügend grosse Reihe von Stimmgabeln, ein Klavier ohne Dämpfer, wird durch einen hinreichend stark einwirkenden Klang in Mitschwingung gerathen, und zwar werden alle die Saiten und nur die Saiten, welche den einfachen, im Klang enthaltenen Tönen entsprechen, mitschwingen. Hier findet sich also eine

124 PFAUNDLER, Sitzgsber. d. Wiener Acad. LXXIV. S. 561. 1877.

ähnliche Trennung der periodischen Bewegung in einfache Componenten auf rein mechanischem Wege, wie wir dieselbe vom Ohr erwarten dürfen. Bei dem Clavier findet sich dadurch eine Unvollkommenheit, dass die Saiten bei naher Tonquelle ziemlich leicht in ihren Obertönen mitschwingen (was durch Belastung der Mitte zu vermeiden wäre) und dass die Intervalle der Klaviertöne zu grosse sind. Davon abgesehen, könnte dem tastenden Finger verrathen werden, welche einzelnen Töne in einem Klang enthalten sind; wir würden so den Klang direct analysiren können. Denkt man sich mit jeder Saite einen Nerven der Art verbunden, dass er durch Schwingungen derselben gereizt werde, verschieden stark, je nach der Amplitude der Schwingungen, so würde damit der Grundriss einer Einrichtung gegeben sein, welche die für eine Klanganalyse erforderlichen Bedingungen erfüllt. Wir werden also nach einer Reihenfolge abgestimmter Apparate zu suchen haben, deren jeder seinen besonderen Nerven habe.

Wollten wir dagegen den Nerven die Fähigkeit zuschreiben, die Anzahl der Erschütterungen welche ihn treffen, einzeln zu empfinden und daraus die Tonempfindung zu gestalten, so würde für die Klanganalyse nichts damit gewonnen sein. Denn die Anzahl der Stösse, welche von einem Klang ausgehen, kann diejenige des höchsten Theiltons und wenn dieser zu schwach ist, diejenige eines der niederen Theiltöne sein und nur diesen Ton würden wir hören, nicht den Klang.

Ist die von HELMHOLTZ vertretene Ansicht richtig, so müssen noch weitere Angaben über die Abstimmung der Theile Geltung haben. Der Vorgang des Mittönens ist nämlich verschieden, je nachdem der Körper lange nachtönt oder seine Bewegung schnell verliert. Körper, welche lange nachtönen sind unter sonst gleichen Verhältnissen des Mittönens in hohem Grade fähig. Bei solchen können sich die kleinen Stösse der Einzelschwingungen des erregenden Tons in langer Reihe summiren, und dies wird geschehen, wenn diese Stösse genau synchron mit dem Ton stärkster Resonanz des mitschwingenden Körpers sind. Findet letzteres nicht statt, so werden sehr bald die positiven Phasen des einen, mit den negativen Phasen des anderen Körpers coincidiren, wodurch die vorhandene Mitschwingung gehemmt, statt gefördert wird.

Schwingt dagegen ein solcher Körper rasch ab, kommt er z. B. schon nach 10 Schwingungen annähernd zur Ruhe, wenn jeder Anstoss aufhört, so kann der einzelne Anstoss nicht über 10 Schwingungen hinaus nachwirken, und daher kommt es nicht darauf an, ob

der 10. Anstoss auf eine merklich andere Schwingungsphase des ab-schwingenden Körpers treffen würde, wie der erste, wenn nur der 2., 3. u. s. w. Anstoss den Körper beinahe in richtiger Phase und der 10. ihn wenigstens in einer die Schwingung nicht hemmenden Weise trifft. In solchem Fall wird also der anstossende Ton schon etwas von dem Resonanzton des schwingenden Körpers abweichen dürfen, ohne einen viel geringeren Effekt, als ein genau übereinstimmender Ton, hervorzubringen, es wird aber der resonirende Körper überhaupt nicht in starke Mitschwingungen versetzt werden können.

Zur Uebersicht des Zusammenhangs dieser Verhältnisse hat HELMHOLTZ eine Tabelle berechnet. Ein mitschwingender Körper, welcher von einer, seinem Resonanzton gleichgestimmten Tonquelle zu einer Intensität des Mitschwingens = 100 gebracht ist, wird aus-schwingend, früher oder später, je nach dem Grade seiner Dämpfung, auf $\frac{1}{10}$ der früheren Intensität gekommen sein. Derselbe Körper wird durch eine, bis auf einen gewissen Grad verstimmte Tonquelle zum Tönen in $\frac{1}{10}$ der Intensität 100 gebracht werden. Beides hängt nach dem Obengesagten zusammen und dieser Zusammen-hang ist nach der Rechnung folgender.

Tab. IV.

Differenz der Tonhöhe, durch welche die Intensität des Mitschwingens auf $\frac{1}{10}$ reducirt wird.	Zahl der Schwingungen, nach welchen die Intensität des abklingenden Tons auf $\frac{1}{10}$ reducirt wird.
1. Ein achtel Ton	38,00
2. Ein viertel Ton	19,00
3. Ein halber Ton	9,50
4. Drei viertel Ton	6,33
5. Ein ganzer Ton	4,75
6. Fünf viertel Ton	3,80
7. Kleine Terz ($\frac{3}{2}$ Ton) . .	3,17
8. Sieben viertel Ton . .	2,77
9. Grosse Terz (2 Töne) .	2.37

Es wird zu fragen sein, welche dieser Dämpfungsstufen der ton-empfindende Apparat unseres Ohres haben wird? Da zwei rasch nach einander angeschlagene Töne, namentlich wenn die Anschläge wie beim Trillern sich wiederholen, vom Ohr nur dann deutlich und ge-sondert wahrgenommen werden können, wenn die erste Tonerregung nahe verschwunden ist sobald die zweite erfolgt, so ist hier ein Moment gegeben, das als Grundlage der Prüfung unserer mitschwin-genden Labyrinththeile dienen kann. Da zwei, um das Intervall eines halben Tons von einander abstehende Klänge, einen scharfen Miss-

klang geben, wenn sie gleichzeitig erklingen, muss nothwendig dasselbe entstehen, wenn sie so rasch hintereinander angeschlagen werden, dass die Empfindung des einen Tons noch nicht genügend erloschen ist, sobald diejenige des anderen schon genügend stark entwickelt ist. Dieser Fall findet sich beim Trillern im Allgemeinen nicht, doch steht zu erwarten, dass gerade dabei die Bedingungen für sein Eintreten zu erzielen sein werden. Die Untersuchung birgt manche praktische Schwierigkeiten, sowohl bezüglich der Technik und der Zeit des objectiven Verklingens des Tons, als auch weil durchstehend gleich stark wirkende Töne zur sicheren Vergleichung nöthig sind. HELMHOLTZ sucht jedoch auf diesem Wege zu einer annähernden Entscheidung zu kommen und macht deshalb die Annahme, dass ein Abklingen bis auf $\frac{1}{10}$ der durch die betreffenden Töne gesetzten Erregung ausreiche, um die Nervenreizung genügend verschwinden zu lassen. Er findet, dass jeder der beiden Töne beim Trillern etwa 5 mal die Sekunde angeschlagen werde, und dass auf zahlreichen für den Zweck untersuchten Instrumenten Triller vom *A* mit 110 Schwingungen abwärts schlecht klingen und von keinem Künstler gut ausgeführt werden können.

Man kann also sagen: da beim Trillern auf *AB* das *A* nach $\frac{1}{5}$ Sekunden neu angeschlagen wird, muss der beim *A* mitschwingende Theil nach $\frac{110}{5}$, also 22 Schwingungen schon sehr merklich leise schwingen, wenn das *A* uns als von Neuem angeschlagen erscheinen soll. Nehmen wir an es schwinde bis $\frac{1}{10}$ der ursprünglichen Intensität ab, so würde es der 2. Reihe in Tab. IV angehören; die Dämpfung würde also so gross sein, dass der um $\frac{1}{4}$ Ton erhöhte oder verringerte zugehörige Ton eine Mitschwingung bis zum eben Merklichen hervorrufen kann. Um mit dem *B* keinen Misston zu geben, muss er aber schon nach $\frac{1}{10}$ Sekunde, also nach 11 Schwingungen wenig merklich geworden sein. Es ist daher richtig, mit HELMHOLTZ anzunehmen, dass die Dämpfung etwa der 3. Stufe Tab. IV, in welcher die Differenz eines halben Tons die Schwingung auf $\frac{1}{10}$ herabsetzt, entspreche. Unter dieser allerdings noch sehr willkürlichen Annahme lässt sich folgende Tabelle für die Intensität des Mitschwingens berechnen.

Tab. V.

Differenz der Tonhöhe.	Intensität des Mitschwingens.
0,0	100
0,1	74
0,2	41

Differenz der Tonhöhe.	Intensität des Mitschwingens.
0,3	24
0,4	15
halber Ton	10
0,6	7,2
0,7	5,4
0,8	4,2
0,9	3,3
ganzer Ton	2,7

Auch die Empfindungen der *Schwebungen* werden von HELMHOLTZ auf die Mitschwingung der elastischen Theile bezogen. Er hebt ^(6. S. 272) hervor, dass Schwebungen im Ohr nur bestehen können, wenn zwei angegebene Töne in der Scala nahe genug liegen um ein elastisches Nervenanhängsel gleichzeitig in Mitschwingung zu versetzen, wo dann natürlich je nach der Phase entweder Verdoppelung oder Auslöschung der Bewegung eintreten wird. Die Richtigkeit dieses Satzes ist unbestreitbar und gewiss wird ein rascher Wechsel der Schwingungen für das Ohr ebensowenig eine harmonische Empfindung aufkommen lassen, wie eine intermittirende und flackernde Beleuchtung dem Auge angenehm ist.

EXNER ¹²⁵ glaubt, dass für die Empfindung der Stösse und wohl aller Geräusche, der Apparat für die Klanganalyse würde ausreichen können. Nachdem er gefunden hat, dass die kleinsten wahrnehmbaren Zeitdifferenzen sich auf 0,002 Sekunden belaufen, weist er nach, dass eine auf den Ton 4000 abgestimmte Faser unter Annahme des 3. Dämpfungsgrades Tab. IV schon 8 Schwingungen in 0,002 Sekunden machen würde, also genügend gedämpft sein würde, um durch einen zweiten Stoss eine neue Erregung zu setzen. Der elektrische Funke mit dessen Hülfe obige Zahl erlangt wurde, bringt nach Untersuchungen von TÖPLER ¹²⁶ in der Luft nur einen einfachen Stoss hervor, dagegen erzeugt ein einzelner, ja selbst mehrere Tonstösse, wie wir sehen noch keine Tonempfindung. Daraus müsse man den Schluss machen, dass doch der Klangapparat nicht den Knall des Funkens werde zur Wahrnehmung bringen können. Diesem Bedenken stelle sich jedoch die Beobachtung gegenüber, dass bei Variation der Schnelligkeit, mit welcher sich Funkenreihen folgen, die Empfindung eines höher oder tiefer Werdens des Geräusches deutlich eintrete. Diese Erfahrung würde entweder denn doch auf die Be-

125 EXNER, Arch. f. d. ges. Physiol. XI. S. 417.

126 TÖPLER, Beobachtungen nach einer neuen opt. Methode. Bonn, Cohen. 1864.

theiligung des klangempfindenden Apparates deuten, oder sie würde auf einen zweiten Apparat, der gleichfalls Höhen- und Tiefenempfindung hervorzurufen vermag, zu beziehen sein. Zwei verschiedene Endapparate von Sinnesnerven, welche beide die gleiche Empfindung der Tonhöhe hervorrufen, stimmen nicht mit unseren Kenntnissen von den Sinnesorganen überein und widersprechen den „Gesetzen der spezifischen Sinnesenergie“. Setze man voraus, dass das Zustandekommen und der Grad der Erregung in der Nervenfasern nicht allein abhängen von der Elongation der aus ihrer Gleichgewichtslage geführten, abgestimmten Faser, sondern auch von der Geschwindigkeit mit welcher diese Faser ihre Bewegung ausführe, so liege darin eine Erklärung der stosspercipirenden Thätigkeit des Klangapparates.

In Verfolgung dieser Möglichkeit weist EXNER nach, dass der erste Ausschlag einer verschieden abgestimmten Feder, welche durch einen Wasserstrahl constanter Periodicität angesprochen wird, stets nahe dieselbe Form hat, möge auch die spätere Schwingungsform noch so sehr unter dem Einfluss der jeweiligen Abstimmung der Feder stehen. Es bringe daher der erste Anstoss in allen Fasern des Klangapparates dieselbe erste Schwingung, nämlich von der Wellenlänge des einwirkenden Tons hervor. Bei sehr kurzen Schallwellen, wie die des elektrischen Funkens (3 mm nach TÖPLER) werde die erste Bewegung der Faser sehr schroff und steil sein müssen und daher wohl eine besondere Empfindung auslösen können.

Wir gerathen hier auf ein sehr dunkles Gebiet, das aber doch, so weit unsere Kenntnisse gestatten wollen, besprochen sein muss. Der Knall des Funkens bringt nach EXNER'S Untersuchungen eine jedenfalls sehr kleine Bewegung des Trommelfells hervor; man kann einsehen, wie eine solche stark genug sein kann um bei Wiederholungen eine einzelne Saite mitschwingen zu machen, aber die Erregung aller Theile des Klangapparates zugleich scheint wenig wahrscheinlich, auch würde dann durch Nachschwingung in den tiefer gestimmten Theilen der zweite Funke verlöscht werden müssen. Eine sehr plötzliche Bewegung wird ebensowohl durch einen Ton starker Amplitude wie durch eine sehr kurze Welle hervorgebracht werden, wie soll der Nerv beides unterscheiden? Könnte er dies, so würde er auch Phasenverschiebungen bemerken können, da dabei die Steilheit der Gesamtwelle sich bedeutend ändert. Die Unterscheidung der Tonhöhe scheint aus zwei Gründen nicht solche Beweiskraft zu haben, wie oben angenommen. Es ist nämlich die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, dass das Trommelfell auf den einfachen Stoss, falls derselbe denn wirklich einfach ist, was neuere Untersuchungen nicht recht bestätigen,

Nachschwingungen mache, namentlich aber scheint die Entstehung von KÖNIG's Stosstönen oder wenn man lieber will von Combinationstönen bei Versuchen mit Reihen von Funken, wohl unvermeidlich zu sein. Ferner ist die Empfindung der Höhe und Tiefe der Töne nicht nothwendig unmittelbar mit dem Klangapparat verknüpft. Jeder Ton erweckt sein besonderes Gefühl wie J. J. MÜLLER⁽⁵⁷⁾ eingehend begründet hat, aber die Tonhöhe spielt dabei keine unmittelbare Rolle. Einfache Leute mit gutem Gehör nennen die Töne je nach der Höhe grob oder fein, ihnen ist der besondere Klang mit diesen Eigenschaften behaftet, aber nicht damit identisch. Zur Entscheidung ob ein Ton höher oder tiefer sei, wird sehr häufig der Grad der Anstrengung untersucht, welche der Kehlkopf macht, indem er beide Töne zu reproduciren sucht. Ob daher die Höhe und Tiefe des Tons eine einfache Empfindung und nicht vielmehr ein complicirter Act, bei dem das Gedächtniss wesentlich mitwirkt, eine Wahrnehmung ist, erscheint noch zweifelhaft.

Es entsteht aber die weitere Frage, ob ein gesonderter Apparat für die Empfindung der Stösse und Geräusche angenommen werden kann?

Es ist klar, dass ein und derselbe elastische Körper durch die interferirenden Wellen bewegt werden muss, wenn wir die Schwebungen, welche zwei Töne mit einander geben, empfinden sollen, aber es scheint darum doch nicht nothwendig zu sein auf die abgestimmten Organe des Labyrinths, auf den Klangapparat zurückzugreifen. Das Trommelfell erfüllt nämlich bereits die oben gestellte Bedingung und vielleicht hängt es schon von dem Grade der Dämpfung und der Ungenauigkeit seines Mitschwingens ab, wenn sehr rasche Stösse kaum wahrgenommen werden. Durch das Trommelfell werden die Schwebungen dem Labyrinthwasser mitgetheilt und es ist gewiss nicht zu bezweifeln, dass auch die abgestimmten Theile davon ergriffen werden können, jedoch werden die Intervalle etwas gross, wenn es sich um die Mitschwingung ein und desselben Theils handelt. Schweben z. B. *a* und *h* miteinander, so würde die Faser für *b* am stärksten in Schwebungen versetzt werden müssen, sie würde jedoch, weil sie durch jeden der beiden Töne nur $\frac{1}{10}$ mal so stark wie es sein könnte, erregt wird, immer nur schwach mitschwingen und es scheint, dass wir den Ton *b* müssten schwebend hören können, während wir in der That wechselnd *a* und *h* hören. Um ein Urtheil über den Einfluss der *Verschiedenheit* sich rasch folgenden Schalls auf das Unterscheidungsvermögen zu gewinnen, ersuchte ich den Observator hiesiger Sternwarte, DR. PETERS, um eine

bezügliche Vergleichung einiger, ihm in grosser Anzahl zur Verfügung stehender Chronometer. Derselbe hatte die Güte mir folgende Tabelle mitzutheilen. Es wurden die Coincidenzen je zweier Chronometer beobachtet und berechnet und diese Chronometer waren so gewählt, dass die Stärke des Schlages nahe gleich war, während bei 1 der Klang sehr nahe gleich, bei 2 wenig verschieden, bei 3 ziemlich stark verschieden und bei 4 sehr verschieden war. Sämmtliche Uhren schlugen halbe Sekunden. Die erste Beobachtungsreihe ist voll wiedergegeben, von den drei anderen sind nur die Fehler angegeben.

Tab. VI.*

No. 1. (KNOBLICH No. 1816. — TIEDE No. 106.)			No. 2	No. 3	No. 4				
Beobachtet			Berechnet	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler		
h.	m.	s.	h.	m.	s.	s.	s.	s.	s.
13	40	35	13	40	33,53	— 1,47	+ 0,34	— 0,73	— 1,13
„	43	44	„	43	44,52	+ 0,52	+ 1,08	— 1,86	+ 0,55
„	46	55	„	46	55,52	+ 0,52	— 1,17	+ 0,02	— 0,78
„	50	7	„	50	6,51	— 0,49	— 0,42	+ 2,89	+ 1,89
„	53	17	„	53	17,51	+ 0,51	+ 0,32	+ 0,76	+ 0,56
„	56	27	„	56	28,50	+ 1,50	— 0,94	— 0,37	— 0,76
„	59	39	„	59	39,49	+ 0,49	— 0,19	+ 0,51	— 1,09
14	2	51	14	2	50,49	— 0,51	+ 0,56	+ 0,38	+ 0,58
„	6	2	„	6	1,48	— 0,52	+ 0,30	— 0,75	+ 2,26
„	9	13	„	9	12,48	— 0,52	+ 0,04	— 0,87	— 2,07
			mittlerer Fehler	± 0,90	± 0,73	± 1,36	± 1,48		
			grösster Fehler	1,47	1,17	1,86	2,26		

Es ergibt sich dass die besten Beobachtungen diejenigen sind, bei denen der Klang der Tonquellen etwas verschieden war. Bei sehr starker Verschiedenheit wird nach Ansicht des, in diesen Untersuchungen sehr geübten Beobachters, die Aufmerksamkeit leicht einem der beiden Klänge besonders zugewendet und dadurch die Beobachtung gestört.

* Berechnet nach der Methode der kleinsten Quadrate; als Unbekannte dienten der Fehler der ersten Beobachtung und die mittlere Zwischenzeit zwischen je zwei Coincidenzen. Die gefundene Zwischenzeit war z. B. für No. 1 3 m. 11 s., sie ist mit einem Fehler ξ behaftet, der Fehler der ersten Beobachtung sei z . Dann hat man

$$A. \left. \begin{aligned} 13 \text{ h. } 40 \text{ m. } 35 \text{ s.} &= 13 \text{ h. } 40 \text{ m. } 35 \text{ s.} + z && \text{woraus } 0 \text{ s.} = + z \\ 13 \text{ „ } 43 \text{ „ } 44 \text{ „} &= 13 \text{ „ } 43 \text{ „ } 46 \text{ „ } + z + \frac{2}{3} \xi && \text{„ } 0 \text{ „} = + 2 + z + \frac{2}{3} \xi \\ 13 \text{ „ } 46 \text{ „ } 55 \text{ „} &= 13 \text{ „ } 46 \text{ „ } 57 \text{ „ } + z + 2 \frac{2}{3} \xi && \text{„ } 0 \text{ „} = + 2 + z + 2 \frac{2}{3} \xi \\ 13 \text{ „ } 50 \text{ „ } 7 \text{ „} &= 13 \text{ „ } 50 \text{ „ } 8 \text{ „ } + z + 3 \frac{2}{3} \xi && \text{„ } 0 \text{ „} = + 1 + z + 3 \frac{2}{3} \xi \end{aligned} \right\} B.$$

u. s. w. Die Gleichung B, nach der Methode der kleinsten Quadrate aufgelöst, geben schliesslich für No. 1 $z = - 1,47 \text{ s.}$, $\xi = 0,006$. Diese, in A eingesetzt, geben den berechneten Werth.

Die Forderung, dass ein und derselbe abgestimmte Theil die Vergleichung am genauesten mache, wird durch obige Reihen nicht gestützt. Nicht zu verkennen ist es, dass ein einheitlicher Apparat, der jeden Stoss und jede Stossfolge des Steigbügels zur Empfindung brächte, grossen Nutzen gewähren könnte. Für solche Apparate scheint die Erfüllung folgender Bedingungen unerlässlich. Es müssen nämlich die diesem Apparat zugehörenden Ganglienzellen, die, dem Nervensystem zukommende Eigenschaft, sich an continuirlich und gleichmässig treffende Reize zu gewöhnen und dieselben zu vernachlässigen, in besonders starker Ausbildung besitzen. Da wir wissen, dass das Auge sich viel weniger schnell als das Geruchsorgan an Reize gewöhnt, so ist gegen eine solche Annahme nicht allzuviel einzuwenden, aber der Beweis, dass wirklich eine so überaus rasche Gewöhnung stattfindet, wird schwierig sein.

Zur Zeit wäre hier nur eine Eigenthümlichkeit in der Empfindung der Schwebungen tieferer Töne geltend zu machen. Bei Schwebungen von weniger als 30 mal in der Minute verfolgt das Ohr die An- und Abschwellung des Tons sehr vollkommen. Schwebt der Ton aber zwischen etwa 30 bis 180 mal die Minute, so hat man durchaus nicht diejenige Empfindung, welche die Curve Fig. 29 verlangt, sondern der Ton wächst wie die Curve von *b* bis *d* oder bis zur Mitte, bricht dann aber plötzlich ab, als wenn die Curve schon bei *d'* so niedrig würde wie sie bei *b'* ist. Die Töne „schlagen“ und zwar nicht etwa so wie man einen Hammerschlag hört, sondern so wie man den Schlag ausführt, langsam beginnend, rascher werdend und plötzlich endend. Die obige Annahme würde diese auffallende Erscheinung erklären können, ohne dass den abgestimmten Theilen neue Eigenschaften beigelegt werden müssen.

Eine interessante Beobachtung über die Leichtigkeit mit der sich das Ohr gewöhnt, berichtete DELBOEUF¹²⁷, der sich an das Geräusch eines Wasserfalls so völlig gewöhnt hatte, dass er beim Horchen darauf glauben konnte, der Wasserfall habe aufgehört, während er doch so laut war, dass er es erschwerte, Tischgespräche zu führen. Diese Beobachtung passt allerdings nur im Allgemeinen auf die vorliegende Frage.

Haben wir ferner in dem Labyrinth oder an der Labyrinthwand einen Theil, der unbedingt die Bewegung des Wassers mitmachen muss und ist dieser Theil durch Empfindung vermittelnde Fäden mit

127 DELBOEUF, Théorie générale de la Sensibilité. Mémoires couronnés p. l'Académie de Belgique 1875. p. 38.

einem relativ festen Theil verknüpft, so wäre der Geräuschapparat gebildet. So würden sich verhalten, einerseits: Hörhärchen und *Macula acustica*, andererseits als weniger beweglicher Theil: *Crista acustica* resp. die schwer bewegliche Otolithenmasse.

Ein solcher Apparat würde Toneinsätze, plötzliche Schwellungen des Tons und Stösse bis zu einer gewissen Häufigkeit anzeigen, dagegen durch periodische Bewegungen von einiger Dauer und Häufigkeit kaum erregt werden, weil er sich an dieselben rasch gewöhnt. Dagegen würde eine solche Klangbewegung, wie Figur 3, allerdings wohl unter Umständen Geräuschempfindung veranlassen können, ob dies dabei wirklich statt hat, bedürfte weiterer Untersuchungen.

Das Resultat dieser Betrachtungen ist also, dass jedenfalls eine Reihe von Nervenanhängen gesucht werden muss, welche mit einer gewissen Dämpfung auf die Reihe von Tönen, die wir hören können, abgestimmt wäre. Daneben ist vielleicht einem zweiten Apparat nachzuforschen, welcher Stösse und Schwebungen zur Wahrnehmung bringt.*

IV. Vergleichende Morphologie des Labyrinths und Würdigung der Apparate desselben.

Soll nun nach diesen Apparaten gesucht werden, so tritt die vergleichende Morphologie in ihr Recht, da sich erwarten lässt, dass sie die Organe in allen Stufen von grösster Einfachheit an, uns vorführt.

Die Otolithensäcke finden sich in sehr grosser Verbreitung. Akalephen und Rippenquallen, Würmer, Bivalven, Cephalophoren und Cephalopoden, endlich die Makruren unter den höheren Krebsen, weisen viele Ordnungen auf, innerhalb deren Otolithen regelmässig vorkommen. Bezüglich der Beschaffenheit dieser Bildungen findet ein ziemlich grosser Wechsel statt. Bei den Knochenfischen, Cephalopoden, Cephalophoren, einzelnen Lamellibranchiern, einigen Krebsen und craspedoten Akalephen finden sich die Otolithen als compacte, härtere oder sehr weiche, krystallinische Steine; bei den höheren Wirbelthieren und den Rochen, bei vielen Würmern, Bivalven und Rippenquallen u. a. m. sind es Krystallanhäufungen in mehr oder weniger schleimiger Grundlage, die einzelnen Krystalle rhombisch oder mit abgerundeten Spitzen und Kanten; bei vielen Krebsen endlich sind es von aussen aufgenommene und an die Endapparate ge-

* PREYER⁽²⁾ vertritt gleichfalls die Ansicht, dass ein besonderer Theil des Ohres für Stösse u. s. w. in Anspruch zu nehmen sei.

brachte feine Sandkörnchen, welche bei jeder Häutung erneut werden müssen. Ein physiologischer Grund für die Verschiedenheit des Baus dieser Theile ist nicht anzugeben, wahrscheinlich ist sie nur ein Ausdruck der chemischen Eigenthümlichkeiten und der Structur des ganzen Organismus; es ist daher wohl nicht anzunehmen, dass die Gestaltung der Otolithenmasse für den Hörvorgang Bedeutung habe.

Man kann eine Gruppe der ruhenden und der durch Cilien bewegten Otolithen unterscheiden. Letztere finden sich bei Cephalophoren, Bivalven, Würmern, Rippenquallen und selbst noch bei Fischen (Cyclostomen). Die Otolithen drehen sich und schwanken hin und her, wo Otokonie vorhanden ist, stossen die einzelnen Krystalle mit einem, in Folge der anzuwendenden Vergrösserung, rasch erscheinenden Impulse gegen einander. Ein Vortheil dieser Einrichtung besteht darin, dass die Otolithen völlig frei suspendirt gehalten, ein Nachtheil, dass sie, ausser von Schallstössen, auch noch durch die Cilien erschüttert werden. Vielleicht sind die Stösse zu leise, um Störungen zu verursachen, vielleicht wird das Thier durch Gewöhnung dagegen unempfindlich, etwas Sicheres lässt sich natürlich nicht aussagen.

Es ist für die höheren Krebse der Befund gemacht, dass die Endapparate, welche den Otolithen tragen, resp. in den Otolithensand hineinragen, so weit aus der Form zu entnehmen ist, abgestimmte Apparate sind. Dem Otolithensand des Hummers anliegend sind z. B. 468 Nervenendhaare gezählt, von denen keines die gleiche Grösse hat und die sich in continuirlicher Abstufung folgen. Das grösste ist 0,72, das kleinste 0,14 mm. lang, und da alle anderen Dimensionen ähnlich abnehmen, ergibt sich ein Massenunterschied von 140:1. Mit den Dimensionen von Orgelpfeifen verglichen, würde obige Reihe etwa 3 Octaven umfassen. Aehnlich wird der Otolith von Mysis (Fig. 30. A) von 57 Haaren getragen, welche eine Reihe von, auf der einen Seite des Halbkreises, in welchem diese Haare stehen, ziemlich groben, auf der anderen Seite sehr fein werdenden Härchen bilden.

Bei den sehr viel feineren und kürzeren Otolithenhaaren der Weichthiere und Wirbelthiere sind solche Abstufungen entweder nicht vorhanden oder wegen zu grosser Feinheit der Theile nicht erkannt. Aus HASSE'S Untersuchungen geht hervor, dass die Schnecke sich aus der allmählichen Umwandlung eines Otolithensackes hervorildet, daher könnte man daran denken, dass dabei eine Trennung von Functionen eintritt, welche ursprünglich alle dem Otolithensack zukommen, aber dann natürlich minder entwickelt sind.

Hörhaare. Ausser den Otolithen finden sich bei den Krebsen in demselben Raum, welcher die Steine birgt, oder an derselben Stelle (erstes Glied der inneren Antenne), wo sich bei anderen Krebsen Otolithen finden, zuweilen ausserdem an der Körperoberfläche, frei stehende Nervenanhänge, deren Bedeutung als Hörhaare nach Art, Structur und Anordnung als sehr wahrscheinlich bezeichnet werden kann. Diese Härchen stehen theils in einer Linie von z. B. bei *Carcinus maenas* 40 Stück, und bestehen aus ausserordent-

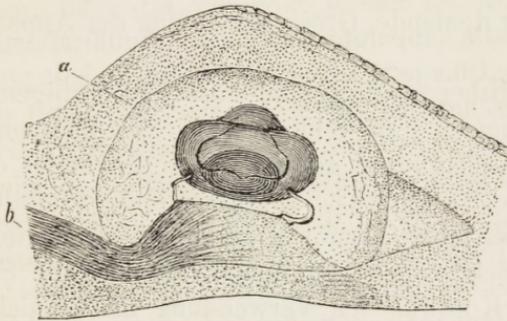


Fig. 30. A. Otolithensack von *Mysis*. *a* der Otolithensack. *b* der Nerv, zu einer Vorwulstung im Sack gehend. Der geschichtete Otolith ist ohne Weiteres deutlich. Von dem Kranz der Haare, welche ihn tragen und ihm eingewachsen sind, sieht man rechts ein grösseres, links ein kleineres. Vergrößerung 70 mal.

lich feinen, sehr langen, annähernd gleichgrossen Gebilden (Fig. 30. B), welche den geschlossenen Raum in zwei Hälften theilen und in sehr vielen Verhältnissen an die Härchenbildung in der Ampulle erinnern. An anderen Stellen des geschlossenen Sacks finden sich sehr flache, lanzettförmige Härchen verschiedener Grösse auf einem Fleck vereint, an dritter Stelle Bildungen, die in Allem den Otolithenhaaren gleichen. Letztere Form, die bei *Mysis* z. B. auch auf bestimmten Stellen der Körperoberfläche vorkommt, zeigt auch Volumensunterschiede, aber doch nicht so auffallend und nicht in so regelmässiger Vertheilung, wie bei den Otolithenhaaren. Der Bau aller dieser Anhänge ist so beschaffen, dass eine Erschütterung sich wohl in Nervenreizung umsetzen kann, wenn dieselbe genügend rasch und intensiv erfolgt, denn das Nerven-



Fig. 30. B. Hörhaar aus dem Hörsack von *Carcinus maenas*. *a* das Haar, an seiner Spitze einen gefiederten Anhang tragend. *b* Chitinhaut des Buckels, auf dem diese Haare stehen. *c* der Hörnerv, in eine Ganglienzelle *e* auslaufend, von der aus sich ein Faden *f* bis in die kuglige dünnwandige Auftreibung, mit welcher das Haar beginnt, fortsetzt. Dieser Faden hat in Wirklichkeit die halbe Länge des Haars und ist hier nur, der Raumersparniss wegen, kürzer gezeichnet.

ende wird durch Erschütterungen des Haars hin und her gerissen. Wenn diese Bildungen als Homologa der Ampullenhärchen aufgefasst werden dürfen, so deutet die Verschiedenartigkeit ihrer Formen darauf hin, dass mehr Leistungen von diesen Gebilden gewährt werden können, als unsere jetzige Einsicht von dem akustisch Erforderlichen, erkennen lässt.

Die Gehörorgane der Insecten zeigen eine ganz andere Beschaffenheit, so dass man kaum weiss, ob man sie als zahlreiche Otolithenapparate, ob als Hörhaare deuten soll. Nur das ist physiologisch beachtenswerth, dass z. B. bei *Locusta* eine regelmässige, auf akustische Abstimmung deutende, Grössenabstufung der Apparate sehr hervortritt.

Der Bau der Otolithenapparate und halbcirkelförmigen Kanäle der höheren Thiere hat bis jetzt keine besonderen Anhaltspunkte für die physiologischen Anschauungen gegeben, dagegen bietet der complicirteste Apparat, die Schnecke, allerdings einige Anhaltspunkte für die Art, wie die physikalischen Desiderate erfüllt werden.

Nachdem die Ansicht von E. H. WEBER¹²⁸, dass die Schnecke zum Hören durch die Kopfknochen Verwendung finde, nicht genügend gerechtfertigt erschien, glaubte HELMHOLTZ⁽⁶⁾ in diesem Organ den Apparat für die Klanganalyse suchen zu sollen. Die Hörsteinchen, in einer schleimigen Flüssigkeit suspendirt, seien regelmässiger Schwingungen weniger fähig, und eher geeignet, einzelnen Stössen nachzugeben, dasselbe gelte wohl auch von den Härchen in den Ampullen, da Körperchen von so geringer Masse in ihren Bewegungen nicht lange verharren können. Es lässt sich nicht leugnen, dass die Klanganalyse von sehr ausgedehnter Wichtigkeit für das Hören ist, und dass die Ausdehnung, in welcher wir dieselbe benutzen, einen sehr complicirten Apparat erforderlich macht, und eine hohe Leistung ist. Daher erscheint die von HELMHOLTZ getroffene Wahl, dem am höchsten organisirten, am spätesten entwickelten Apparat — der Schnecke — diese Aufgabe zuzuschreiben, von vornherein gerechtfertigt.* HELMHOLTZ exemplificirte die abgestimmten Organe zunächst an den Bogenpfeilern, diese sind jedoch an Grösse nicht genügend verschieden^(115a), auch zeigten HASSE's⁽¹¹³⁾ Untersuchungen, dass bei Vögeln, deren Hörfähigkeit für Sprache und Ton für manche

128 E. H. WEBER, De utilitate cochleae. Prol. IV. 1829.

* Ich hatte früher, z. Th. durch den Befund abgestimmter Theile bei niederen Thieren veranlasst, geltend gemacht, dass der Schnecke wohl eine höhere Leistung als nur die, durch Töne erregt zu werden, zukomme, da das Mitschwingen auf Töne einen relativ einfachen Apparat erfordert. Letzteres ist bei näherer Betrachtung für in Wasser schwingende Theile wohl nicht so einfach, und bekenne ich gerne, dass ich jetzt mehr noch wie früher der Darstellung von HELMHOLTZ zustimme.

Species erwiesen ist, die Bogenpfeiler gänzlich schwinden und von den eigenthümlichen Apparaten der Schnecke nur die Stäbchenzellen, die Membr. basilaris und die Membr. Cortii übrig bleiben. HENSEN hatte schon früher ^(115a) darauf aufmerksam gemacht, dass die Membrana basilaris der abgestimmte Theil sein dürfte, da ihr eigenthümlicher Bau und ihre continuirliche Verbreiterung von Anfang bis zu Ende des Kanals die Annahme nahe legten, dass die einzelnen, den Saiten entsprechenden Radien eine, von den hohen bis zu den tiefen Tönen hinunter continuirlich fortgehende Abstimmung hätten.

HELMHOLTZ prüfte diese Ansicht durch Rechnung. Unter der Annahme, dass die Membran in der mit den Schneckenwindungen parallelen Richtung nicht gespannt sei, sondern nur in der darauf normalen, ergiebt seine, tief in die Mechanik der Elasticitätslehre eingehende Rechnung, auf welche hier nur verwiesen werden kann ^(6. Beil. XI), Folgendes.

Wenn die bewegende Kraft Z einen Theil $-\nu \frac{dz}{dt}$ hat, der von der Reibung herrührt, und wenn sie einen periodisch veränderlichen Druck $A \cos (nt)$ ausübt, ergiebt sich, wenn m eine ungerade Zahl ausdrückt und $\frac{1}{m} S_m$ die Amplitude der betreffenden Schwingungsform der Membran sein soll, dass ist:

$$S_m = \frac{\mathfrak{S}}{\sqrt{1 + \frac{m^4 \pi^4 Q^2}{n^2 \nu^2} \left[\frac{1}{\beta^2} - \frac{1}{b^2} \right]^2}}$$

In diesem Ausdruck bedeutet $\frac{n}{2\pi}$ die Schwingungszahl des Tons. $\mathfrak{S} = \frac{4A}{\pi n \nu}$ ist das Schwingungsmaximum, welches bei bester Abstimmung gewonnen werden könnte. Q ist die radiäre Spannung der Membran gemessen in der Einheit, welche der Spannung in der Quadratfläche μ der Membran das Gleichgewicht halten würde. β ist die Breite der Membran an der betreffenden Stelle und endlich b der Werth von β , welcher der Maximumbedingung von S_m nämlich

$$m^2 \pi^2 Q - \beta^2 \mu n^2 = 0$$

Genüge leistet.

Sobald ν , der Reibungscoefficient, unendlich klein ist, wird S_m nur dann einen endlichen Werth haben, wenn $b - \beta$ von derselben Ordnung ist wie ν . Dies kann nur für sehr schmale Streifen der Membran stattfinden, von denen dann der erste eine, der zweite zwei, der dritte drei schwingende Abtheilungen hat, deren Länge $\frac{\beta}{m}$

überall denselben Werth hat. Je grösser ν desto breiter werden die schwingenden Abtheilungen. Es wird also jeder Ton auch die Stellen mitschwingen machen, welche den ungraden harmonischen Untertönen entsprechen, wenn die Membran gleichmässig belastet, die Knoten also gleichmässig vertheilt wären. Die Intensität derselben wäre dann noch mit den Factoren $\frac{1}{9} \frac{1}{25} \dots \frac{1}{m^2}$ zu multipliciren, würde also sehr rasch unmerklich werden. In der That bemerkt man von Mitschwingungen harmonischer Untertöne nichts.

Demnach ist es gerechtfertigt, die Annahme, dass die Membr. basilaris der abgestimmte Theil sei, weiter zu verfolgen. Die Consequenz würde sein, dass die aufsitzenden Theile ins Besondere die Papilla spiralis auf und abwärts bewegt werden, die auf den HUSCHKE'Schen Zähnen haftende Membrana Cortii würde dagegen, insofern sie nur den Stäbchen der CORTI'Schen Zellen aufruht, nicht mitschwingen, sondern je nachdem, von den Stäbchen in die Höhe gedrückt oder losgelassen werden. Dies gilt allerdings nur für den Fall, dass die Membrana Cortii selbst keine nennenswerthe Abstimmung habe, aber das kann wohl angenommen werden. Die Erregung der Nerven würde nach dem Princip des HEIDENHAIN'Schen Tetanomotors geschehen, indem die mit einer Art Tastapparat versehenen (Fig. 25) Endzellen gegen die, wie wir sahen, an entsprechender Stelle verdichtete Substanz der Membr. Cortii anstossen; den Bogenfasern würde eine gewisse Nachgiebigkeit gegen zu starke Stösse beizumessen sein. Die Anzahl der Zellen entspricht etwa den Anforderungen, welche empirisch an die Zahl der abgestimmten Theile gestellt werden müssen. Die Erregung der Nerven hat an sich nichts spezifisches, aber jeder Nerv mit seiner Ganglienzelle ist eine Individualität, welche als solche sich kenntlich macht, und welche wir mit Hilfe des Gedächtnisses als diesem oder jenem Ton zugehörig, wiederzuerkennen vermögen.

Eine solche Hypothese zu bilden ist gewiss die Aufgabe der Wissenschaft, aber es wäre unwissenschaftlich, auf dieselbe ein nennenswerthes Gewicht zu legen, so lange die bestätigenden Thatsachen noch so lückenhaft sind, wie zur Zeit. Die Möglichkeit, dass der vorhandene Apparat noch in anderer Weise wirke, als wir es voraussetzen, ist gewiss vorhanden, und es muss nach solchen Möglichkeiten gesucht werden.* Erweist sich unsere Hypothese nicht

* RINNE⁽²¹⁾ hat sich in eingehender Weise gegen die Hypothese des Mitschwingens der Schneckenheile, wie HELMHOLTZ sie ursprünglich formulirte, gewendet. Sein Standpunkt ist dabei der, dass der Nutzen einer Klanganalyse durch das Ohr nicht

haltbar, so kann nur das eine gewünscht werden, dass die Physiologie nicht in die Unmöglichkeit zurückfalle, sich eine plausible Vorstellung über die Function der akustischen Organe zu bilden.

Eine nicht unerhebliche Schwierigkeit für unsere Vorstellungen bildet

Die Schallwellenleitung im Wasser des Labyrinths.

Wir haben gesehen, dass der Steigbügel mit grosser Kraft auf die Perilymphe stösst; es ist die Frage zu erledigen, welche Bewegung der Flüssigkeit daraus resultirt. Wäre die Labyrinthkapsel allseitig geschlossen, so würde der Stoss, welcher die Flüssigkeit trifft, von Molekül zu Molekül sich fortpflanzend, als Kugelwelle an die Knochenwandungen schlagen und theils durch dieselben weiter gehen, theils reflectirt werden. Um unter diesen Umständen nennenswerthe Verschiebungen der Moleküle zu erhalten, würden so grosse Kräfte erforderlich sein, dass der Steigbügel sie kaum liefern könnte. Die Bewegungen desselben würden jedenfalls enorm herabgesetzt werden. Wir betrachten daher mit HELMHOLTZ ⁽³²⁾ diese Molekularschwingungen, so weit sie überhaupt in der nicht ganz geschlossenen Labyrinthkapsel entstehen können, als zu klein, um in Betracht zu kommen.

Da in dem Labyrinthwasser die Dimensionen der ganzen Masse verschwindend klein gegen die Wellenlänge sind und die Wände des umschliessenden Felsenbeins beim Menschen so fest sind, dass sie den hier in Betracht kommenden, geringen Druckkräften gegenüber, als absolut fest betrachtet werden dürfen, so geschieht aus denselben Gründen, welche S. 50 bei den Gehörknöchelchen zur Sprache kamen, die Ausbreitung des Stosses so gut wie augenblicklich und das Labyrinthwasser bewegt sich nicht merklich anders, als eine ab-

einzusehen sei. Für die Wahrnehmung eines Accordes wäre nichts gewonnen, wenn die Nervenfasern a als Partialsubject für die Wahrnehmung des Tones a die Nervenfasern b für die des Tones β functionire, denn es müsse ein über beiden stehendes Subject vorhanden sein, welches befähigt ist, aus dem Contact mit den Nervenfasern a und b in gewisser Weise die Töne a und β zu reproduciren. Sei dies doch nöthig, so sei der ganze hypothetisch statuirte künstliche Mechanismus der Klanganalyse eigentlich überflüssig. Bewegungen, die doch einmal bestimmt seien, innerhalb unserer Seele zu räumlich ungetrennten, rein intensiven Zuständen derselben zusammenzufließen, bedürften auch wohl zur Erreichung dieses Zieles nicht getrennter Wege. Dem physikalischen Mechanismus von HELMHOLTZ sei ein psychischer Mechanismus entgegenzustellen, durch den die Seele die durch ein und dieselben Nervenfasern ungetheilt zugeführten Eindrücke zerlege.

Das Herbeiziehen von seelischen Vorgängen, mit denen ja Alles zu erklären ist, in die Physiologie des Ohrs, welche nur die geordnete Verwandlung von Ton- in Nervenbewegung und deren Verlauf zu erforschen hat, heisst die Geltung der naturwissenschaftlichen Lehrsätze für dies Gebiet leugnen.

solut incompressible und daher der Schallschwingungen unfähige Flüssigkeit. Sie wird daher von der Steigbügelplatte fortgeschoben werden, sobald in dem Labyrinth ein Platz zum Ausweichen vorhanden ist. Orte an denen die Flüssigkeit ausweichen kann sind 1) die beiden Oeffnungen des Aquaeductus vestibuli. Indem hier Flüssigkeit eintritt wird sie an den Otolithen vorbeistreichen und in die Säcke Bewegung bringen. Dabei werden nach HELMHOLTZ¹²⁹ wohl Wirbelbewegungen in den halbkirkelförmigen Kanälen entstehen.

Die Flüssigkeit kann 2) ausweichen in die Blutgefäßsporen des Knochens, 3) in den Aquaeductus cochleae, 4) gegen die Paukenhöhle durch Ausbuchtung der Membr. tympani secundaria. Dass ein erheblicher Theil des Stosses auf dem letzteren Wege sich ausgleicht, ist namentlich nach MACH's Untersuchungen, wie wir S. 49 sahen, unzweifelhaft.

Bei solchen Verschiebungen entwickelt die Flüssigkeit eine grosse Reibung; wird der Finger in eine Flüssigkeit getaucht, welche von einem Ton durchsetzt wird, so fühlt man diese Reibung sehr deutlich. Daher erscheint es weit bemerkenswerther, wenn ein Nerven- anhang sich unter diesen Einflüssen nicht mitbewegt, als wenn er mitschwingt.

Es ist noch etwas genauer auf die Wasserbewegung in der Schnecke einzugehen. Da die Bewegung bei Tonerregung momentan an der Fenestra rotunda anlangt, kann sie nicht durch das Helikotrema gehen, denn wäre dies der Fall, so würde keine Zeit für die Entstehung einer Druckdifferenz zwischen den beiden Flächen der Membr. basilaris sein oder besser umgekehrt: da die Membr. basilaris nachgiebig ist, wird der Druckausgleich nicht durch das Helikotrema, sondern durch sie hindurch stattfinden. Das Helikotrema mag zum Druckausgleich bei sehr langsamen Druckänderungen dienen. In der Membr. basilaris werden die abgestimmten Streifen am ausgiebigsten der Wasserbewegung nachgeben, die Stellen der graden Theiltöne am wenigsten. Die Frage wird sein: an welchen Stellen die Nervenerregung eintritt? Kann die dicke, auf fester Unterlage sich stützende und mit Faserzügen (Fig. 26), deren Richtung den Widerstand erleichtert, versehene Membrana Cortii dem Druck der Flüssigkeit widerstehen, so würde die Flüssigkeit an der dünnen Epithelfläche der Zona pectinata zuerst einen Eindruck machen, es würde von hieraus der abgestimmte Membranstreifen in Bewegung gesetzt und die Stäbchenzellen würden folglich gegen die Membrana

129 HELMHOLTZ, Ueb. discontinuirliche Flüssigkeitsbewegungen. Monatsber. d. Berl. Akad. 23. April 1868.

Cortii vibriren. Ist aber letztere Membran gegen Druck nachgiebig, so würde sie überall auf die Stäbchen niedergedrückt werden; diesem Druck würden die mit dem Ton gleichgestimmten Streifen am leichtesten weichen, die Streifen der jeweiligen graden Obertöne am schwersten, die Erregung würde also an letzteren Streifen gesetzt. Mir scheint, dass der Bau der Zona pectinata und ferner die Eigenthümlichkeit, dass die Membrana Cortii diesseits derselben aufhört die erstere Annahme, dass die Bewegung von der Zona pectinata aus beginne, als die wahrscheinlichere erscheinen lässt; es bleibt aber zwischen den zwei so verschiedenen Erregungsmodalitäten die Wahl leider noch offen.*

V. Experimentelle Beobachtungen über Bewegung der Nervenanhänge.

Mikroskopische Beobachtungen über die akustischen Bewegungen der Apparate können angestellt werden, weil manche niederen Thiere durchsichtig genug sind, um den Gehörapparat unverletzt zur Beobachtung zu bringen und weil man an der Verbreiterung der Contouren solcher Theile das Vorhandensein von Schwingungen erkennen kann, ohne jede Schwingung einzeln sichtbar machen zu müssen. Leider war bisher die gewonnene Ausbeute sehr gering.

RANKE¹³⁰ hat das Gehörorgan lebender Heteropoden beobachtet. Die Wand der Ohrblase dieser Thiere ist mit, auf circa 50 isolirten Polstern sitzenden, Cilien versehen. An dem einen Pol der runden, einen grossen Otolithen bergenden Blase sind diese Cilien durch Bündel starrer Härchen, die ohne Zweifel als Hörhaare zu deuten sind, vertreten. Der Stein füllt die Blase bei weitem nicht aus.

In der akustischen Ruhe liegen alle Cilien der Innenwand der Gehörblase an, der Otolith schwebt in der Mitte der Blase. Bei jedem stärkeren Schall schnellen die Cilien (welche lang genug sind, um den Otolithen ausgedehnt zu berühren), blitzschnell gegen den Otolithen auf. Dadurch wird derselbe in relativ fester Stellung gehalten und zugleich gegen die Stelle der Hörhärchen angedrängt. Letzteres erklärt sich aus der grossen Kürze der Cilien jener Seite. Die Schallbewegung würde sich durch Wasser und Wandung der Blase auf die Stäbchen übertragen, der Otolith wird bei stärkeren

* Der Eigenton abgestimmter Theile ist im Wasser einige Tonstufen tiefer als in der Luft, es ist aber nicht möglich für die Theile des Labyrinths genauere Aussagen zu machen.

130 J. RANKE, Ztschr. f. wiss. Zool. XXV. Supplementband S. 77.

akustischen Reizen (über deren Art nicht berichtet ist) in eine Stellung zu den Nervenanhängen gebracht, welche ihm gestattet, gegen sie anzuschwingen. Er wird dabei ebensowohl die Function eines Tetanomotors wie seiner grossen Masse halber, die eines Dämpfers haben.

Bei einer Nachuntersuchung des Gegenstandes ist es mir nicht geglückt den Otolithen in vollständiger Ruhe zu sehen, die Thiere waren, wie RANKE verlangt, völlig lebenskräftig. Es scheint dass der Otolith bei Ruhe der Cilien auf den Boden der Blase sinken müsste, was jedoch nicht beobachtet worden ist. Bei Einleitung des Tons ins Wasser mit Hülfe von Membranen traten häufig die von RANKE beschriebenen Bewegungen auf. Dieselben traten jedoch auch ein, ohne dass eine Tonerregung stattzufinden schien. Es machte den Eindruck als wenn, wie dies auch CLAUS¹³¹ angiebt, die Hörhäärchen sehr fein ausliefen, ähnlich wie an der Crista acustica von Fischen, so dass ich über ihr Ende nicht klar wurde. Es ist wohl möglich, dass sie lang genug sind um fortwährend dem Otolithen in kürzerer oder längerer Strecke anzuliegen.

An den Hörhaaren von Krebsen sind von HENSEN^(9, S. 374) einige Versuche gemacht. Die Thiere (Mysis) reagiren auf jeden Schall sehr lebhaft, so lange man die Versuche nicht zu häufig wiederholt. Es ergab sich bei Beobachtung der Hörhaare auf der Körperoberfläche, dass dieselben bei Zuleitung starker Töne in Schwingung kamen und dass namentlich der Nerv dabei hin und her bewegt wurde, ferner zeigte sich, dass verschiedene Haare auf verschiedene Töne am stärksten reagirten. Letzteres Verhalten scheint gar nicht anders zu deuten zu sein als so, dass die Haare als abgestimmte Organe zu betrachten seien, denn die Unvollkommenheiten der Tonzuleitung und des Toninstrumentes mussten alle Theile gleichmässig treffen. Die wirkliche Abstimmung des Haares konnte nicht ermittelt werden, da nur mit einem Klapphorn als Tonapparat experimentirt werden konnte. Einige Beispiele deuten darauf hin, dass es Untertöne der wahren Abstimmung waren, welche die Erregung setzten. Die Häärchen waren jedoch bei keinem genügend starken Ton völlig bewegungslos und es ist, wie HELMHOLTZ richtig bemerkt, nur der Nachweis, dass solche Theile schwingen und abgestimmt sein können, an diesen Versuchen von Interesse. RINNE⁽²¹⁾ hat die Versuche einer genauen Analyse unterworfen, und findet, dass sie sich nicht mit den theoretischen Postulaten des Mitschwingens abgestimmter Theile decken. Da jedoch nur Schätzungen und keine messenden Versuche vorliegen, gehen

131 CLAUS, Arch. f. microscop. Anat. 1876. S. 103.

seine Ansprüche an die theoretische Genauigkeit der gegebenen Beispiele zu weit.

Die genauere Untersuchung bietet weit mehr Schwierigkeiten als sich voraussehen liess, so dass auch erneute Versuche mit besseren Apparaten nur Einiges hinzuzufügen lassen. Als einfachster und wirksamster Zuführungsapparat des Schalls erweist sich ein Rohr von circa 1 Cm. Lichtenweite, welches mit der Tonquelle möglichst direct verbunden und mit einer ganz schlaffen Membran überzogen, ins Wasser versenkt wird. Die meisten Versuche sind jedoch mit dem Apparat Fig. 18 gemacht worden.

Die Reihe der sehr langgestreckten Hörhaare von *Carcinus maenas*, welche den Härchen der Ampulle in allen Verhältnissen so sehr nahe stehen, konnten nach Eröffnung des Gehörtraums beobachtet werden. Dieselben kommen durch Stösse, welche das Wasser treffen in starke pendelnde Bewegung, wenn diese periodisch alle 3 Secunden bis etwa 5 mal die Secunde sich wiederholen. Die Bewegung ist die eines im Wasser vertical angeketeten Holzsparrens, welcher natürlich den Fluctuationen des Wassers folgt. Töne und Schwebungen verursachten keine nennenswerthen Bewegungen.

Der Otolith von *Mysis* zeigt die am meisten auffälligen Bewegungen bei Schwebungen und zwar schien es, als wenn die Seite des Steins, welche auf den grösseren Hörhaaren ruht, bei langsameren, diejenige der feineren Hörhärchen bei rascheren Schwebungen die grösseren Excursionen zeigte. Die Gewinnung genauer Maasse und Zahlen gelang bisher nicht; wie ich meine, weil die Apparate, Sirene und Orgelpfeifen, mit denen der Ton zugeleitet wurde, noch nicht an Kraft und Regelmässigkeit das leisteten, was für messende Bestimmungen nothwendig ist. Aehnliches gilt für die freien Hörhaare, von denen manche, wie mir schien, höhere Töne erforderten als der Zeit in genügender Weise zur Verfügung standen, während andere und zwar grössere und bestimmte kleinere, durch langsamere Schwingungen von 10 bis 40 die Sec. in starke Mitbewegungen kamen. Dieselben erstreckten sich dann nicht nur auf den Theil, wo der Nerv sich ansetzt (*Lingula*), sondern das ganze Haar federte auf der kugelförmig erweiterten Ansatzstelle.

Diese Versuche muss ich als erste Anfänge bezeichnen, die vielleicht nur den Weg zur Ausdehnung unserer Beobachtungen angeben, während die Physiologie umfassendere Untersuchungen abwarten muss, ehe sie daraus eine Lehre gestalten kann.

DRITTES CAPITEL.

Die Leistungen des Gehörapparates für seine ersten Ganglienfelder.

I. Bereich der Tonempfindung.

Die Grenzen der Tonempfindung nach Höhe und Tiefe sind nicht genau zu bestimmen. Es zeigt sich nemlich, dass die Intensität der Töne an den Grenzen unverhältnissmässig gesteigert werden muss, um die Bewegungen als Ton zu empfinden und dass das Unterscheidungsvermögen für die verschiedenen Töne hier so stumpf wird, dass Verwechslungen schwer zu vermeiden sind. (Dies entspricht übrigens der von HENSEN für das obere Ende der Papilla spiralis in der Schnecke angegebenen Unvollkommenheit des Baues, die Radix ist wenig studirt.) Da wir also an den Grenzen keine klare Tonempfindung mehr haben, liegt die doppelte Gefahr vor, dass wir Obertöne resp. Differenztöne für den Grundton halten, und dass die sehr starke Bewegung die letzten Endapparate noch mit erschüttert, obgleich deren Stimmung höher resp. tiefer liegt. Solche Täuschungen scheinen bei den älteren Versuchen von SAUVEUR¹³², CHLADNI¹³³, BIOT¹³⁴, WOLLASTON¹³⁵ und SAVART¹³⁶ zu nicht richtigen Resultaten geführt zu haben, da sie durch Schwingungen von Saiten (¹³³ u. ¹³⁴) oder durch Stösse eines Zahnrades gegen ein Kartenblatt (¹³⁶) die Grenzen festzustellen suchten. DEPRETZ¹³⁷ und namentlich HELMHOLTZ⁽⁶⁾ haben nachgewiesen, dass bei solchen Versuchen mit tiefsten Tönen die Obertöne sehr kräftig zur Wahrnehmung kommen und in der That allein gehört werden. Der Nachweis geschieht namentlich durch Beobachtung der Schwebungszahl, welche die Sirene bei Drehung des oberen Kastens bei den scheinbar tiefsten Tönen giebt, es zeigt sich dass man die Octave hört.

Um diese Obertöne auszuschliessen, belastete HELMHOLTZ eine Saite in ihrer Mitte durch ein Kupferstück, wodurch die näher liegenden Theiltöne ausgeschlossen werden. Dann beobachtete er die Schwingungen durch einen Schlauch, welcher sein Ohr mit dem rings ge-

132 SAUVEUR, Hist. de l'acad. roy d. sciences. Anné 1700. II. édit. Amsterd. 1734. Hist. p. 190. (citirt nach PREYER.)

133 CHLADNI, Die Akustik. Leipzig 1802.

134 BIOT, Lehrb. d. Experimentalphysik. Dtsch. v. FECHNER. II. S. 13 u. 21. 1829.

135 WOLLASTON, Philosophical Transaction. p. 310. London 1820.

136 SAVART, Ann. d. Physik. 1830 u. 31.

137 DEPRETZ, Compt. rend. XX. p. 1215. 1845.

schlossenen Resonanzkasten verband. Bei 34 Schwingungen hörte die Tonempfindung auf, doch gaben sehr schwere Stimmgabeln bei 9 mm. Amplitude noch eine Tonspur für 28 Schwingungen die Secunde.

PREYER¹³⁸ ist weiter gekommen. Er benutzte eine Reihe von 24 Metallzungen von 8 bis 40 Schwingungen, welche in zum Anblasen eingerichteten Kästen standen. Bei dem Anblasen wird ein Dröhnen unbestimmter Art gehört, lässt man die Zungen dann ausschwingen, so hört das Ohr einen tiefen, summenden Ton, den man wohl auf die einfachen Schwingungen beziehen muss. Die Tiefe des Tones nimmt zu bis 24 Schwingungen, bei grösserer Tiefe nimmt die Intensität sehr rasch ab, aber während bei 14 Schwingungen gar kein Ton zu hören ist, vermag PREYER einen Ton schon bei 16 Schwingungen zu hören, während andere Personen dies erst bei 19 bis 23 Schwingungen können. Es müssen diese Versuche jedoch geübt werden, auch ist die musikalische Bestimmung dieser tiefen Töne schlechterdings unmöglich.

Wie bei den tiefsten Tönen die Grenze der Tonempfindung immer weiter hinausgeschoben wurde, haben auch die Grenzen für die Empfindung der höchsten Töne sich erweitert. CHLADNI und BIOT fanden die Grenzen bei 8192 Schwingungen. WOLLASTON scheint nach PREYER bis 25000 Schwingungen gekommen zu sein, auch war er der erste, welcher mit Hülfe des Zirpens von Grillen die grossen individuellen Verschiedenheiten für die obere Tongrenze des Menschen nachwies. SAVART kam mittelst des Zahnrades dazu, wohl 24000 Schwingungen hörbar zu machen, während DESPRETZ mittelst Stimmgabeln noch 32000 Schwingungen in der Secunde als Ton empfand.

Es lässt sich jedoch die Zuverlässigkeit der Bestimmungen dieser Zahlen bezweifeln, denn das Ohr unterscheidet bei so hohen Tönen die Intervalle nicht mehr deutlich, und Abstimmung sowie Controle der Instrumente wird schwierig. Man muss daher die Tonhöhe mittelbar feststellen. KÖNIG benutzte bei dieser Bestimmung die Beziehung, welche zwischen den Longitudinal- und Transversal-Schwingungen eines Stabes besteht. Ist nemlich N^1 die Anzahl der Longitudinalschwingungen des ganzen Stabes, N die der Transversalschwingungen, wenn der Stab an zwei Enden aufgelegt ist, l die Länge und r der Radius des Stabes, so ist

$$N^1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{g \varepsilon}{5}}; \quad N = \frac{\pi r}{4l^2} \sqrt{\frac{g \varepsilon}{5}}. \quad \text{Daher}$$

138 PREYER, Ueb. d. Grenzen d. Tonwahrnehmung. Physiol. Abhandl. Jena, Duft. 1876. Neuerdings⁽⁵⁾ ist eine weitere Bestätigung des Befundes mit Hülfe sehr schwerer Stimmgabeln publicirt worden.

$$N = \frac{\pi r}{2l} \cdot N^1.$$

Man braucht daher nur den Longitudinalton eines sehr langen cylindrischen Stabes zu bestimmen, um dann aus demselben Stücke entnehmen zu können, welche durch Transversalschwingungen jeden Ton geben müssen, dem ihre Länge nach obiger Formel entspricht. Es zeigte sich, dass der Ton c^{VIII} von 32768 Schwingungen fast von Niemandem gehört wurde, wohl aber tiefere Töne desselben Stabes. Viele Personen hören Stabtöne bis zu 20000, manche nur bis 12000 Schwingungen.

APPUNN hat eine Reihe von Stimmgabeln, welche bis zu 40460 Schwingungen gehen, construiert und dieselben mit Hilfe von Differenztönen abgestimmt. Es zeigt sich, dass PREYER und viele Andere den höchsten Ton ohne Schwierigkeit hören und dass bis zu ihm hinauf eine Zunahme der Tonhöhe wahrgenommen wird. Sonderbarer Weise gesellen sich bei vielen Personen den höchsten Tönen unangenehme Sensationen bei, Schmerz im Ohr, Hautgefühle im Nacken u. s. w. Die eigentliche Grenze nach Oben scheint mit jenen 40000 Schwingungen noch nicht erreicht zu sein. Die höchsten Töne können kaum stark genug gemacht werden, um das, wie ich glaube etwas rigide, menschliche Trommelfell zum Schwingen zu bringen.

II. Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen.

Die Genauigkeit, mit welcher das Ohr kleine Differenzen in der Zahl der Schwingungen ähnlicher Tonquellen zu unterscheiden vermag, ist eine sehr grosse. Dies hat sich namentlich durch PREYER'S⁽¹³⁵⁾ Untersuchungen herausgestellt. Bei den Versuchen wird zunächst für eine solche Gleichmässigkeit der Tonquelle und Tonangabe gesorgt werden müssen, dass ein und derselbe Ton immer als solcher wieder erkannt werden kann; ebenso müssen Tonanfang, Stärke und Abschluss gleichmässig wiederholt werden können. Dies wurde von PREYER mittelst eines Tondifferenzapparates von APPUNN erreicht, welcher bestand aus 11 Zungenpfeifen von 500 bis 501 Schwingungen mit je $\frac{1}{10}$ Differenz, 6 Pfeifen von 1000 bis 1001 mit je $\frac{1}{5}$ Schwingung Differenz und dann noch den Tönen 504, 508, 512, 1008, 1016, 1024, 2048, 4096. Dieselben waren mit Hilfe von Schwebungen abgestimmt. Ungeübte Personen unterschieden innerhalb der Octaven $c(128)$ bis $c''' 1024$ v. d. einen Unterschied von 8 bis 16 Schwingungen, Uebung bringt sie bald weiter. Sehr geübte und musikalische Menschen haben eine so nahe übereinstimmende Unterschiedsempfindlichkeit, dass präzisere Aussagen gemacht werden können.

Es ergibt sich, dass überhaupt nur ein Unterschied von $\frac{1}{3}$ Schwingung erkannt werden kann und auch dies nur in der Gegend von a' bis c'' , darüber und darunter nimmt das Unterscheidungsvermögen ab; über c^v kommen Irrthümer bis zu 100, ja bis 1000 Schwingungen vor. PREYER hat über die Empfindlichkeit für Tondifferenzen innerhalb der gebräuchlicheren Töne folgende Tabelle gegeben. In derselben bedeuten: n die Schwingungszahlen, d die Differenz, welche n hinzuzufügen ist, um einen Unterschied hörbar zu machen: $a = \frac{1}{d}$ die auf die Einheit reducirte sog. absolute Unterschiedsempfindlichkeit und $E = \frac{n}{d}$ die relative Unterschiedsempfindlichkeit.

Tab. VII.	n	d	a	E
	120	0,418	2,39	287
	490	0,363	2,75	1212
	500	0,300	3,33	1666
	1000	0,500	2,00	2000

E. H. WEBER¹³⁹ hat auf Grund früherer Versuche, die von DELEZENNE, W. WEBER und namentlich SEEBECK⁽⁵²⁾ herrührten, erklärt, es komme für die Unterscheidung nicht darauf an, ob innerhalb der gebräuchlichen Grenzen die verglichenen Töne hoch oder tief lägen, denn nicht die Zahl der Schwingungen, sondern das Verhältniss der Zahl der Schwingungen werde verglichen. Diese Aussage, und somit dieser Theil des psychophysischen Gesetzes, bestätigt sich nach PREYER nicht, denn die relative Unterschiedsempfindlichkeit ändert sich, da sie bei 100 Schwingungen etwa 200, bei 1000, 2000 beträgt.*

PREYER hat ferner die Feinheit des Gefühls für die Reinheit von Intervallen untersucht. In der folgenden Tab. VIII giebt der Quotient $i = n' : n$ die Abweichung vom reinen Intervall r . Die Empfindlichkeit E ist $\frac{r-i}{r}$ oder $\frac{i-r}{r}$. Um das Empfindlichkeitsmaass für die Schwingungszahldifferenz zu erhalten, diene folgende Betrachtung. Bei den Intervallen kann man nicht die Differenz $n_1 - n$ benutzen, sondern der Fehler wird gemacht, indem sowohl für n_1 wie für n eine Anzahl von x -Schwingungen mehr oder weniger dem richtigen Intervall angerechnet werden. Es ist also

$$\frac{n_1 - x}{n + x} = r \text{ oder } \frac{n_1 + x}{n - x} = r$$

daraus ergibt sich

$$\frac{n_1 - nr}{r + 1} = \pm x$$

Da x der Fehler an jedem einzelnen Ton ist, so wird

139 WEBER in WAGNER'S Handwörterb. II. S. 560. 1846.

* Für kurz dauernden Schall durch Fall von Körpern findet jedoch NÖRR (Zeitschrift f. Biolog. 1879. S. 297) das psychophysische Gesetz bestätigt.

$$2x = 2n \frac{(n_1 - rn)}{r+1} = S$$

die gesuchte Schwingungsdifferenz sein. Die folgenden Zahlen sind den zahlreichen numerischen Daten PREYER's entnommen. Das Urtheil begann bei den angegebenen Verhältnissen unsicher zu werden; um Schwebungen zu vermeiden, mussten die Töne successive angegeben werden.

Tab. VIII.

Intervall.	n.	m.	i.	S.	E.	
Quarte (1,333) . . .	187,58	251,23	1,3396	1,02	211	Intervall noch als zu hoch er- kannt.
Quinte (1,5)	167,68	251,23	1,4983	0,23	822	
kl. Sexte (1,6) . . .	143,66	231,41	1,6108	1,19	148	
gr. Terz (1,25) . . }	139,60	163,68	1,2437	0,73	198	
	139,62	175,53	1,2572	0,89	173	
kl. Terz (1,20) . . .	207,54	251,23	1,2102	1,9	117	
Octave (2,0)	500,4	1001	2,0004	0,13	5000	
ganzer Ton (1,125).	215,15	243,51	1,1291	0,85	274	

Diese Beispiele dürften dem Urtheile, welches PREYER aus einer grösseren Zahlenreihe erhalten hat, einigermaassen entsprechen, ein genaues Maass lässt sich überhaupt schwer gewinnen. Bei den tiefsten und höchsten Tönen wird die Unsicherheit sehr gross.

Bei den gebräuchlicheren Tönen ist die Genauigkeit des Urtheils sehr erheblich, namentlich aber ist es überraschend, dass die Vergleichung zwischen Grundton und Octave genauer ist, als die, zwischen Grundton und ihm sehr nahe liegenden Schwingungszahlen. Die Mittel zur Vergleichung werden wir uns ähnlich vorstellen müssen wie beim Tastgefühl. Es handelt sich um Localisirung der Eindrücke, für welche erforderlich wird 1) ein peripherer Gefühlsapparat von genügender Feinheit, 2) genügende Entwicklung der Localzeichen, über welche hier freilich nichts Näheres gesagt werden kann, 3) genügende Uebung. Die Prüfung auf den Unterschied eines Tons von einem benachbarten würde der successiven Berührung einer Hautstelle und des, derselben nächst gelegenen Ortes entsprechen, die Prüfung der Intervalle dagegen der Berührung zweier in bestimmter Distanz von einander liegenden Hautstellen. Man hätte erwarten können, dass letztere Prüfung sehr ungünstige Resultate ergeben würde, jedoch kann man solche Fälle, z. B. die Prüfung auf Octaven vielleicht mit der Berührung homologer Theile zweier Finger vergleichen. Hier ist die Angabe ob z. B. dieselbe Stelle des Zeigefingers und Mittelfingers berührt worden ist, recht genau und es ist keineswegs leicht, Stellen, die für identisch erklärt werden, mit dem Augenmaass voraus zu bestimmen!

Nach PREYER scheint eine Uebung in der Kenntniss der Intervalle durch die Empfindung der Theiltöne in den Klängen erworben zu werden; er giebt darüber folgende hübsche Tabelle

Tab. IX.

Es tritt auf zuerst bei Theilton	Es kommt vor bei:	8	12	16	24 Theil- tönen
2	Octave	4 mal	6 mal	8 mal	12 mal
3	Quinte	2 „	4 „	5 „	8 „
4	Quarte	2 „	3 „	4 „	6 „
5	gr. Terz	1 „	2 „	3 „	4 „
5	gr. Sexte	1 „	2 „	3 „	4 „
6	kl. Terz	1 „	2 „	2 „	4 „
7	natürl. Sept	1 „	1 „	2 „	3 „
8	kl. Sexte	1 „	1 „	2 „	3 „

Aus dieser Tabelle ersieht man, dass in den Klängen die verschiedenen Intervalle verschieden häufig und zahlreich auftreten. Die Feinheit unseres Unterscheidungsvermögens scheint sich entsprechend der Uebung, welche wir durch das Auftreten der Intervalle erhalten, auszubilden, wenigstens stimmt die Stufenfolge unseres Unterscheidungsvermögens mit obiger Reihe auffallend gut überein.

Aus der Feinheit unseres Unterscheidungsvermögens muss man über die Anzahl der abgestimmten Endapparate ein Urtheil gewinnen können. Nach Messungen von HENSEN würden etwa 16400, nach Messungen von WALDEYER¹⁴⁰ 20000 CORTI'sche Zellen, also gesonderte Hörnervenenden vorhanden sein. Jeder solchen Zelle entspricht etwa eine Saite der Membrana basilaris; aber freilich ist wegen der verschiedenen Lagerung* nicht jede Zelle als der Nachbarzelle gleichwerthig aufzufassen. PREYER findet, dass ein Ton von n und $n \pm 0,05$ Schwingungen besten Falls die Grenze unseres Unterscheidungsvermögens bildet. Da wir überhaupt von 20 bis 40000 Schwingungen als Töne zu unterscheiden vermögen, so würde obige Zahl von Nervenenden nicht einmal für die Erkennung des Unterschiedes einer ganzen Schwingung ausreichen. Eine so feine Unterscheidung können wir in der That am Anfang und am Ende der Tonreihe nicht machen, es würden von 4000 Schwingungen an vielleicht 400 Nervenenden den empirisch zu machenden Ansprüchen genügen können, aber wenn je $\frac{1}{20}$ Schwingung auch nur zwischen 400 — 1200 Schwin-

140 WALDEYER in STRICKER's Gewebelehre. II. S. 959.

* Vgl. Fig. 26 B. h.

gungen unterschieden werden soll, würden schon 20. 800=16000 Elemente nöthig werden. Man könnte zwar mit HELMHOLTZ annehmen, dass die Stärke des Mitschwingens benachbarter Elemente sehr genau verglichen werde und man sich auf diese Weise ein Urtheil darüber bilden könne, ob der Ton einer gewissen Schwingungszahl zwei Endelemente gleich stark, oder ein Element am stärksten, zwei Nachbarapparate gleich oder auch verschieden stark erzeuge. Im Allgemeinen haben wir Grund (z. B. nach Erfahrungen über das Tastorgan) eine Vereinigung mehrerer anatomischer Elemente zu einer Empfindungseinheit anzunehmen. Denselben eine so grosse Leistung zuzuschreiben, dass dadurch die morphologische Einheit in der ange deuteten Weise zerlegt werde, ist eine Hypothese die man ungerne zulassen wird, denn wir müssen verlangen, dass die morphologischen Einheiten weitaus den physiologischen Anforderungen gerecht werden können, weil uns eher eine Verschwendung derselben (Peripherie der Netzhaut, Riech- und Geschmackszellen) als zu grosse Sparsamkeit damit in der Natur entgegentritt.

Die von PREYER gestellten Anforderungen in Bezug auf genaue und feine Abstimmung der einzelnen Theile des Ohrs sind so hoch, dass die meisten Toninstrumente ihnen nicht würden genügen können. Daher dürfte vielleicht eine grössere Garantie, wie die in der Abhandlung (138) gegebene, für die Constanz der Zungenpfeifen erwünscht sein; namentlich in Bezug auf die Frage, ob zwei behufs der *Abstimmung* zusammen schwingende Zungenpfeifen sich nicht, ähnlich wie andere Toninstrumente, ein wenig beeinflussen, sobald sie sehr nahe gleich gestimmt sind.

III. Das Gefühl für Intensitätsunterschiede und für kleinste Intensitäten.

Hier ist die erste Frage: ob die Intensität der Empfindung proportional oder im quadratischen Verhältniss mit der Amplitude wächst. Die Physiker nehmen als Maass der Intensität die lebendige Kraft der Bewegung also mv^2 , Masse mal das Quadrat ihrer Geschwindigkeit. Da die Geschwindigkeit beim Durchgang durch den 0 Punkt von der Amplitude der Schwingung abhängt, so würde die Intensität, wie das Quadrat der Amplitude wachsen müssen. Für das Ohr liegt die Sache schon deshalb complicirter, weil die Abstimmung und die Dämpfung des Zuleitungsapparates, die Richtung des Gehörgangs und eventuell die Nachgiebigkeit der Bogenfasern in der Schnecke modificirend eingreifen können. HELMHOLTZ (6. Abschnitt 9) hat nachgewiesen, dass ein gleicher, die Luft treibender Druck des

Blasebalgs bei langsam rotirender Sirene nur einen schwachen, bei rascherer Rotation bis zu mindestens 880 Schwingungen hinauf, einen unverhältnissmässig grösseren Effect auf unser Ohr hervorbringt.

SCHAFHÄUTL¹⁴¹ kam zu der, aus der Wirkung des Tensor tympani verständlichen Erfahrung, dass nur die kurzen Schallstösse der sog. krustischen Instrumente für Messungen tauglich seien. Er liess kleine Kugeln aus bestimmbarer Fallhöhe auf wagrechte Glastafeln fallen, während später VIERORDT¹⁴² dafür Schiefer- oder Metallplatten benutzte. Dabei ist $v^2 = 2gs$ (s die Fallhöhe, $g = 9,81$ Meter) also die lebendige Kraft $mv^2 = 2gms$, wenn m die Masse des Körpers. Der sog. elementare Antrieb mv wird $= m\sqrt{2gs}$ sein. SCHAFHÄUTL nahm letztere Grösse als Maass der Intensität und VIERORDT fand, dass dies Maass in der That das richtigere sei. In einer Reihe von Versuchen machte er den Eindruck, welchen eine fallende Kugel von 36,5 mgr. auf sein Ohr hervorbrachte, durch Aenderung der Fallhöhe dem Eindruck gleich, welchen eine Kugel von 56 mgr. beim Fall aus constanter Höhe machte. Die Berechnung des elementaren Antriebs stimmte in den meisten Fällen sehr viel besser mit den Aussagen des Ohrs überein, als die Berechnung der lebendigen Kraft.

Bezüglich der *unteren Grenze der Empfindung* fand SCHAFHÄUTL, dass der Fall eines 1 mm. schweren Korkkügelchens aus 1 mm. Höhe noch wahrgenommen werde. Am genauesten scheinen die bezüglichen Resultate von TÖPLER und BOLTZMANN¹⁴³ zu sein. Dieselben bestimmten unter Anwendung der stroboskopischen Methode mit Hülfe von Interferenzstreifen die Grösse der Luftverdichtung, welche am Ende einer gedackten Orgelpfeife von 181 Schwingungen bei constantem Druck (40 mm. Wasser) eintritt. Die Bestimmung ergab eine Differenz des Luftdrucks von 0,0124 Atmosphären (c. 130 mm. Wasserdruck) und daraus berechnet sich die Bewegung der Luft nahe bei der Mundöffnung der Pfeife zu 2,482 mm. Die Pfeife wurde am Tage unter Eliminirung der Störung durch den Wind, ausserhalb der Stadt bis zu 115 Meter Entfernung gehört. Daraus berechnet sich, unter Zuhülfenahme der, von HELMHOLTZ¹⁴⁴ für das Geschwindigkeitspotential im freien Raum gegebenen Formeln, dass die Luftexcursion am Ohr 0,00004 mm. betrug, bei einer Schwankung des Drucks um eine Wassersäule von 0,018 mm. Pro Quadratmillimeter wirkte dabei in der Secunde eine mechanische Arbeit von

141 SCHAFHÄUTL, Ueb. Phonometrie. Abhandl. d. Gesellsch. d. Wissensch. München 1853.

142 VIERORDT, Messung d. Schallstärke. Ztschr. f. Biologie. S. 300. 1878.

143 TÖPLER u. BOLTZMANN, Ann. d. Physik CXVI. S. 321. 1870.

144 HELMHOLTZ, CRELLE'S Journ. f. Mathematik. LVII.

$\frac{1}{100}$ Billionen Kilogrammometer. Das Trommelfell, mit einer Oberfläche von $33 \square \text{ mm.}$, würde also durch eine Schwingung mit $\frac{1}{543}$ Billionen Kilogrammometer bewegt werden. Eine Kerze würde dem Auge auf dieselbe Distanz bei $33 \square \text{ mm.}$ Pupillenfläche etwa 17 mal mehr mechanische Arbeit übermitteln. Wir würden aber ein Licht viel weiter sehen können, wahrscheinlich aber auch die Pfeife bei Nacht viel weiter zu hören vermögen. Die kleinsten hörbaren Bewegungen des *Trommelfells* werden sehr viel kleiner sein müssen als obige Grösse von $0,00004 \text{ mm.}$, weil die Masse der Luft so viel kleiner ist, wie diejenige des Trommelfells; eine directe Beobachtung so kleiner Verschiebungen geht über die Leistung des Mikroskops hinaus, RAYLEIGH¹⁴⁵ berechnet sogar die Amplitude der Lufttheilchen zu $0,000001 \text{ mm.}$

Es sind bei diesen Bestimmungen der Einheit des Hörvermögens noch viele Schwierigkeiten zu überwinden. So wenig wir für gewöhnlich die Störungen durch umgebende Geräusche bemerken, so empfinden wir sie doch lästig, sobald ein bestimmtes leises Geräusch gehört werden soll. In dieser Richtung sind einige Versuche von A. M. MEYER¹⁴⁶ angestellt, nach welchen ein höherer Ton durch einen tieferen (der etwa dreimal so stark war) ausgelöscht wird, nicht aber umgekehrt. Uebrigens schwankt die Empfindlichkeit des Ohres sehr merklich, so dass z. B. eine abklingende Stimmgabel nicht continuirlich, sondern mit Schwankungen leiser wird. URBANTSCHITSCH¹⁴⁷ hat darüber einige Beobachtungen angestellt, nach denen sowohl für Töne wie Geräusche eine unregelmässig wechselnde Empfindlichkeit constatirt wurde. Er glaubt dafür den Grund im Nervenapparat suchen zu müssen, wie ja auch über die Retina solche Verdunkelungswellen mit dem Eigenlicht derselben interferirend hinlaufen.

Einige Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Hörschärfe für Töne und für Geräusche nicht immer in demselben Verhältnisse stehe. So berichtet z. B. SCHWARTZE¹⁴⁸ von hochgradiger Verkalkung und Vernarbung beider Trommelfelle bei normaler Hörschärfe für die Ton- und Flüstersprache mit weitgehendem Unvermögen das Ticken einer Uhr zu hören. Aehnlicher Fälle wären manche zu verzeichnen, es wird aber die physiologische Beobachtung und Beobachtungsmethode noch selbständig weiter fortschreiten müssen, ehe sie aus solchen Fällen Nutzen zu ziehen vermag.

145 RAYLEIGH, Ann. d. Physik. Beiblätter. I. S. 500. 1877.

146 ALFRED, M. MEYER's Nature. Vol. XIV. No. 354.

147 URBANTSCHITSCH, Centralbl. f. med. Wiss. No. 37. S. 625. 1875.

148 SCHWARTZE, TRÖLTSCHE'S Arch. I. S. 142.

IV. Bestimmung der individuellen Gehörschärfe.

Aehnlich wie manche andere Sinnesorgane ist auch das Ohr verschiedener Individuen sehr verschieden feinfühlig. Dieser Unterschied tritt auf freiem Felde, bei der Jagd u. s. w. oft auffallend hervor, während er in dem Leben der Städte unmerklich wird und sogar durch die Fähigkeit, von störenden Geräuschen zu abstrahiren, übercompensirt werden kann. Die Apparate zur Bestimmung der Hörschärfe leiden unter der Schwierigkeit, einen Schallapparat von bekannter, nicht zu grosser, lebendiger Kraft, oder doch wenigstens von völliger Constanz und einer, mit anderen gleichen Apparaten vergleichbaren Leistung, herzustellen. Ausserdem ist die Richtung des Ohrs gegen die Tonquelle von Wichtigkeit. Immerhin wird dem praktischen Bedürfniss durch die gebräuchlichen Apparate einigermaassen genügt. Es wird die Schallquelle in solche Entfernung gebracht, dass sie anfängt, hörbar zu sein. Wenn der Schall von einem Punkte aus sich gleichmässig im Raum vertheilt, so verhält sich seine lebendige Kraft umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung der Schallquelle von dem Ort des Horchens. Hört also ein normales Ohr N die Schallquelle in 3 m. Entfernung, ein anderes in nur 80 cm., so ist

$$\frac{1}{300^2} : \frac{1}{80^2} = N : x. \quad 64 N = 900 x.$$

Die Hörschärfe des kranken Ohres x würde also $0,071 N$ sein.

Es dürfen bei diesen Versuchen weder die Wände durch Reflexion des Schalles einwirken, noch, wie bei den Stimmgabeln, Interferenzen von den Flächen des Schallinstrumentes aus gebildet werden. Ausserdem kann die Rechnung nur für grössere Entfernungen gelten, da nur für diese die Schallquelle als Punkt betrachtet werden kann. Endlich macht die Intensitätscurve bei Anlegung des Apparates an das Ohr eine so starke Inflexion, dass jede Vergleichbarkeit aufhört. Durch diese Verhältnisse wird KNAPP'S¹⁴⁹ Vorschlag, die Hörschärfe in Bruchtheilen der Normalhörweite auszudrücken, in der Ausführung minder empfehlenswerth.

Als constante Schallquellen dienen Pendelschläge von Uhren; ausserdem hat POLITZER¹⁵⁰ einen Schallhammer mit stellbarer Hubhöhe empfohlen, auch würden gewiss sonstige Fallapparate mit Vortheil zu verwenden sein. Von LUCAE¹⁵¹ ist ein Phonometer construirt, welches die Stärke des Exspirationshauches misst, und daher gestattet, mit Hülfe der Sprache, deren Intensitätsschwankungen

149 KNAPP, Arch. f. Augen- u. Ohrenheilkunde. III. 1. S. 186.

150 POLITZER, Arch. f. Ohrenheilkunde. XII. S. 104.

151 LUCAE, Ibid. S. 282.

ein Maass in der Aussage des Phonometers finden, Prüfungen der Hörschärfe vorzunehmen.

Von CONTA¹⁵² und nach ihm von MAGNUS¹⁵³ ist versucht worden, aus der Zeit, welche angeschlagene Stimmgabeln brauchen, um bis zum Unhörbaren abzuklingen, die Hörschärfe zu bestimmen. In der That, wenn man den Stiel so formt, dass er leicht in den Gehörgang eingesetzt werden kann und dann an einem aufgesetzten Zeiger die Breite der Schwingung markirt, also den Anfang der Zeitmessung bestimmt, würde das Verfahren einfach und exact sein. Leider ergeben mir genaue Messungen an 3 Stimmgabeln von 256 v. d., dass das logarithmische Decrement hier keine Constante ist, sondern bis zu einer Elongation von 0,07 mm. an und bei einer schweren Stimmgabel von 0,8 mm. an abnimmt (Log. des Decrements: 0,000028 resp. 0,000285), um dann wieder recht merklich, und zwar mindestens auf Log. des Decrements: 0,000047 resp. 0,00069, zu wachsen.

Vielleicht versprechen Versuche, welche HARTMANN¹⁵⁴ mit Hilfe des, durch Inductionsströme bewegten Telephons anstellt, bessere Resultate. PREYER¹⁵⁵ verwendet für Prüfung des Gehörs ein Telephon und einen Rheostaten, durch welche ein constanter Strom geleitet ist. Der Contact wird durch eine Quecksilberverbindung hergestellt, man hört bei Schluss (und Oeffnung) ein leises Ticken, welches sich bei sehr schwachem Element so weit verringern lässt, dass nichts mehr gehört wird. HUGHES* lässt einen unterbrochenen Strom in entgegengesetzter Richtung durch zwei primäre Rollen gehen, legt zwischen beide die mit dem Telephon verbundene secundäre Rolle und stuft, durch Verschiebung derselben, den Ton bis zur geringsten Stärke ab. Dies Verfahren dürfte sich am besten bewähren.

Verstärkungsapparate

für den Schall sind nach zwei Richtungen hin construirt worden. Es kann die Schallquelle virtuell dem Ohr näher gebracht werden, wenn von diesem ein Rohr bis zu ihr hingeführt resp. diese selbst in das Rohr eingeschlossen wird. Dabei tritt ein sehr viel grösserer Theil der Schallbewegung an das Ohr, namentlich wenn das Rohr den Gehörgang hermetisch abschliesst. Da aber denn doch die Wandungen z. B. der Gummischläuche den Schall recht stark nach aussen leiten, findet diese Art der Verstärkung bald eine Grenze. Könnten die

152 CONTA, Arch. f. Ohrenheilkunde. I. S. 107.

153 MAGNUS, Ibid. V. S. 127.

154 HARTMANN, Verhandl. d. physiol. Gesellschaft zu Berlin 11. Jan. 1878. Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1878.

155 PREYER, Sitzgsber. d. Jena'schen Ges. f. Med. 21. Febr. 1879.

* HUGHES, Nature 1879. S. 77 u. 102.

Schallquellen durch feste Körper direct mit dem Trommelfell verbunden werden, so würde dadurch nach SCHMIDKAM⁽⁸⁾, welcher solche Verbindung durch metallische Sonden herstellte, noch mehr gewonnen sein, aber das Verfahren ist zu schwierig und gefährlich, um praktisch in Betracht zu kommen.

Mittelst Schallbechern, also einer künstlichen Vermehrung der Fläche unserer Ohröffnung, wird etwas mehr Schall aufgefangen; jedoch wenn diese Becher nicht sehr gross sind, werden die längeren Tonwellen kaum in gewünschter Weise dem Ohr zugeleitet (vergl. MACH¹⁹⁾). Ausserdem geben diese Apparate durch Bildung stehender Wellen, nach Art der Resonatoren, eine Verstärkung bestimmter Töne. Diese Verstärkung ist aber für das Sprachverständniss unerwünscht und durchaus kein Vortheil. Solche Apparate stellen dagegen die Ohrmuschel zuweilen günstiger für Auffangung in der Nähe erzeugten Schalls, als sie von Natur steht, und dies scheint einigen Nutzen zu gewähren.

Ein sehr gebräuchliches Verstärkungsmittel sind die Resonanzböden, leicht bewegliche Flächen, auf welche sich die Schwingungen fester Körper übertragen und welche durch die grosse Anzahl der in ihnen vibrirenden Oberflächenpunkte die Uebertragung des Schalls an Luft und Ohr sehr vermehren. Durch das sog. Fadentelephon werden zwei solche, weit von einander entfernte Resonanzflächen, welche durch einen dazwischen aufgespannten Faden verbunden sind, nutzbar gemacht, indem man die eine dieser Flächen dem Ohre sehr nahe bringt und daher deutlich hört, was an der anderen Fläche geschieht.

Die neuerdings erfundenen Mikrophone bewirken eine reelle Vermehrung der Schallintensität. Bei denselben verstärken und unterbrechen die Schallstösse mit dem ihnen eigenthümlichen Rhythmus galvanische Ströme, welche auf ein Telephon oder ähnliche Apparate wirken. Es hängt daher die Schallintensität hauptsächlich von der Stärke des Stroms ab. Der Apparat findet Verwendung für Vergrößerung sehr schwacher Schallbewegungen; für Schwerhörigkeit ist davon wenig zu erwarten, weil organische Fehler des Ohrs nicht durch Steigerung der Schallintensität einfach compensirt werden können und eine Steigerung des Schalls über die Stärke der, ins Ohr gerufenen menschlichen Stimme hinaus, zerstörend wirken müsste.

V. Entotische Gehörerregungen.

Absolut ohne Empfindungen ist unser Ohr wohl nie, denn sobald wir auf dasselbe achten, bemerken wir eine Schallerregung irgendwelcher Art. Das Gefühl der Stille beruht nicht auf dem völligen

Ruhezustand unseres Ohrs, sondern es ist eine Abmessung darüber, wie leise die Geräusche sind, welche unser Ohr hört, bestenfalls die Beachtung des Grades der Störung unseres Hörens durch seine entotischen Geräusche. Bei weniger scharfer Aufmerksamkeit bemisst man die Stille nach der Leichtigkeit, mit welcher von den Gehörwahrnehmungen ganz abstrahirt werden kann. In diesem Falle, der um so leichter eintritt, je weniger Lärm vorhanden ist, werden wohl die centralen Enden des Nervus acusticus ausser Einfluss gesetzt, was gleichbedeutend ist mit der Abwesenheit oder Lähmung des Organs.

Entotische Geräusche einiger Intensität treten so leicht in völlig normalen Ohren ein oder sie sind so leicht zu erzeugen, dass wir sie als halbphysiologisch gelten lassen müssen. Es wird die Aufgabe sein, ihren Ort und ihre Ursache festzustellen. Ein sehr grosser Theil hat seinen Sitz in der Paukenhöhle. Eines knackenden Geräusches, welches in ein Stadium der Eröffnung der Tuba fällt und beim Gähnen gehört zu werden pflegt, ist bereits früher Erwähnung geschehen. SCHMIDEKAM⁽⁸⁾ hat dasselbe sehr eingehend behandelt und die Nachweise der zahlreichen Literatur gegeben. Hierher gehört ferner das Muskelgeräusch. Man versteht darunter den dumpfen, von raschen Stössen begleiteten Ton, den jeder Leser hören wird, sobald er den Finger in den Gehörgang ein wenig einpresst. Da sich ergeben hat, dass dieses Geräusch von den Muskeln zum Ohr geleitet wird, findet es sich Bd. I. S. 48 abgehandelt. HELMHOLTZ¹⁵⁶ hat jedoch die Ansicht ausgesprochen, dass der Ton von Eigenschwingungen des Trommelfellapparates herrühre und C—1, wie ihn eine 16füssige offene Orgelpfeife giebt, sei; der Ton werde auch beim Anblasen des Ohrs erhalten. SCHMIDEKAM findet freilich, dass auch bei dem durch Wasser belasteten Trommelfell der Ton von den verschiedensten contrahirten Muskeln des Kopfes aus laut erzeugt werde, aber der Einwand, dass das Trommelfell unter diesen Umständen verstimmt sein müsse, der Eigenton also ein anderer sein werde, ist deshalb nicht stichhaltig, weil unsere Hörschärfe für die Unterscheidung der tiefen Töne nicht ausreicht. Wir wissen, dass auch bei tetanischer Contraction des Tensor tympani der Muskelton auftritt. Wenn ich die entotischen Geräusche meines Ohrs richtig deute, so würde ein, jeweilen ganz ohne äussere Veranlassung, zuweilen auch beim Lauschen auf Gesang auftretender Muskelton mit langsamen Einzelstössen (etwa 10—12 in der Secunde) vom Tetanus des Tensor abhängen.

In der Stille und beim Verschluss des Ohrs können noch andere

156 HELMHOLTZ, Verhandl. d. naturhist.-med. Ver. z. Heidelberg IV. S. 153 u. 161.

im Körper entstehende Geräusche entotisch vernommen werden, so namentlich Pulsationen des Herzens und der Arterien, Inspirations- und Venengeräusche. Es ist auffallend, dass diese Geräusche unter gewöhnlichen Bedingungen nicht gehört werden, da doch die Carotis im Felsenbein liegt und sogar ein Arterienast an den Steigbügel geht! Bei der grossen Empfindlichkeit des Ohrs mögen sehr geringe Exsudatmassen schon genügen, um Leitungswege herzustellen, welche dem Paukenapparat in störender Weise Bewegungen mittheilen. Ferner ist es mit Recht geltend gemacht, dass Störungen in der Ableitung von Bewegungen nach der äusseren Luft zu, also z. B. abnorme Spannungen des Trommelfells oder der Bänder, die Ursache sein könnten, dass Brausen und tiefere Geräusche, welche ein Ausdruck von im Kopf vorhandenen Bewegungen sind, dem Ohre wahrnehmbar werden.

Eine andere Art entotischer Geräusche ist ein hohes Klingen, welches ohne äusseren Anlass und fast ohne begleitende Gefühle auftritt, eine kurze Zeit gleichmässig anhält und dann langsam verklingt. Man ist geneigt diesen Klang auf eine primäre Reizung des Labyrinths zu beziehen und dies findet in dem ganz gleichen Ohrenklingen bei Chininvergiftung eine Stütze. Jedoch selbst in letzterem Falle vermag man durch Zusammenschlagen der Zähne das Klingen auf kurze Zeit zu unterbrechen und es steht überhaupt so stark unter äusseren Einflüssen, dass man das Urtheil über den Sitz des Leidens bis auf genauere Nachweise suspendiren kann. Die Ohrenärzte finden einen gewissen Zusammenhang zwischen dem Auftreten des Ohrenklingens und Gefässinjectionen, letztere werden sowohl bei Chininwirkung¹⁵⁷, wie bei Tinnitus aurium¹⁵⁸ beobachtet. Es ist gewiss möglich, dass in den kleinen Gefässen durch Reibung des Blutes leise Töne entstehen, die bei directester Zuleitung zum Ohr, bei günstigster Spannung z. B. der Steigbügelmembran, hörbar werden können. Da aber der Tinnitus eine sich ziemlich gleichbleibende Tonhöhe hat, so wird auch hier die Zuleitung durch den Stapes, die Fenestra rotunda oder wenigstens das Labyrinthwasser postulirt werden müssen, so lange nicht Grund zu der Annahme ist, dass nur ein an bestimmter Stelle der Membr. basilaris anliegendes Gefäss die Erschütterung bewirke, was ja höchst unwahrscheinlich ist. Wenn das Labyrinth durch ein einfaches hohes Klingen auf Reizung reagirte, würde sich dies schlecht mit unseren sonstigen Ansichten verein-

157 WEBER-LIEL, Deutsche Ztschr. f. prakt. Med. 1875. No. 19 (nach Tenotomie des Tensor tympani bleibt d. Ohrenklingen bestehen). ROOSA, Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. No. 3. 1876.

158 THEOBALD, Ibid. No. 2. 1876.

baren lassen, denn es wäre nicht einzusehen, weshalb immer so wenige, und zugleich nahe dieselben CORTI'schen Zellen dabei erregt werden sollten. Ueberhaupt stände das Auftreten eines dauernden Klanges gleichbleibender Höhe nicht in Uebereinstimmung mit den Erfahrungen über die Reizerscheinungen in anderen Sinnesorganen. Für die Haut finden wir, dass subjectives Jucken und Schmerzen so mannichfaltig wie möglich sind, subjective Geschmacks- und Geruchsempfindungen kennen wir bei Gesunden überhaupt nicht in constanter Wiederholung, und die Reizung der Retina, wenn sie zu subjectiven Lichterscheinungen führt, ist durch den steten Wechsel der Farben- und Lichterscheinungen quälend. Von alle diesem haftet dem gewöhnlichen Ohrenklängen nichts an! Man hat sehr allgemein die Annahme einer Vermehrung des Drucks im Labyrinth zur Erklärung der subjectiven Geräusche, nervöser Taubheit u. s. w. herbeigezogen, aber so sicher wir den analogen Vorgang beim Auge kennen, so wenig lässt sich zu Gunsten eines solchen beim Labyrinth sagen, denn das Labyrinth ist nicht in dem Sinne abgeschlossen wie das Auge; die Membr. tympani secundaria kann dem Druck sehr ausgiebig weichen, der Aquaeductus vestibuli und cochleae bilden freie Communicationsöffnungen nach aussen und die Nervendurchgänge bieten dem Druck keine so bloßgelegte Fläche, als die der Papilla Nervi optici es ist. Der Beweis für das Vorkommen eines erhöhten Drucks im Labyrinth ist nicht geführt worden und es lässt sich nicht einmal angeben, wie dieser Beweis zu führen wäre, wenn einmal alle Oeffnungen des Labyrinths sich durch Exsudate vermauert finden sollten!

Es soll mit Obigem natürlich nicht gelegnet werden, dass Reizungen im Labyrinth oder dem Nervenapparat halbphysiologisch vorkommen können, dieselben scheinen mir aber bis jetzt nicht genügend nachgewiesen zu sein.

Einige merkwürdige Beobachtungen über Ausfall und Verstimmung von Tönen sind hier noch zu erwähnen. MAGNUS¹⁵⁹ hat die Analyse eines Falls gegeben, in welchem die Töne *d'* — *h'* für gewöhnlich nicht gehört wurden, aber allerdings mit Hilfe von Resonatoren noch hörbar gemacht werden konnten. In diesem Falle stellte sich das Gehör wieder her. Ebenso bei einem Kapellmeister, welchem in Folge eines Schlages die Empfindung für die Bassnoten verloren ging. Ein Componist verlor durch den Pfiff einer Locomotive das Gehör für den Diskant dauernd.

Physiologisch interessanter sind die Fälle von Verstimmung des

159 MAGNUS, TRÖLTSCHE'S Arch. II. S. 268. 1867.

Gehörorgans. WITTICH¹⁶⁰ hat an sich selbst in Folge einer Entzündung des Mittelohrs die Töne der eingestrichenen Octave mit dem kranken Ohr um $\frac{1}{2}$ Ton höher als mit dem gesunden wahrgenommen.¹⁶¹ Also für *a* hörte er *b* oder es war nach unserer Hypothese, die auf *b* abgestimmte Saite so viel schlaffer geworden oder so durch Exsudat belastet, dass sie nur noch auf *a* stimmte, nach der Hypothese müsste aber jetzt *a* an zwei Orten der Schnecke, als *a* und *b*, *b* gar nicht deutlich gehört werden. Zugleich wurde eine gewisse Tontaubheit bemerkt, denn das Geräusch einer anschlagenden Glocke konnte auf weitere Strecken gehört werden, wie deren Ton.

Es ist eine kleine Differenz der Tonhöhe beim Hören mit dem rechten und dem linken Ohr von mehreren Beobachtern¹⁶² bemerkt worden, doch stimmen diese Beobachtungen in Bezug auf Constanz des Unterschiedes nicht gut überein.

VI. Nachempfindung und Mitempfindung.

Nachempfindungen, wie sie das Auge in Form von Nachbildern so leicht giebt, sind vom Ohre nicht häufig beobachtet. Nur der Fall, dass gewisse Melodien nicht „los zu werden“ sind, tritt häufig auf. In diesem Falle ist es jedoch mehr der Rhythmus und Tonfall der sich wiederholt, der eigentliche lebendige Klang tritt weniger hervor; es handelt sich dabei wohl mehr um entferntere Gangliengruppen, nicht um Nachempfindung des eigentlichen Gehörapparates. PREYER⁽¹³⁸⁾ berichtet nach langdauernder Einwirkung eines Tons als Nachempfindung ein lautes Plätschern wiederholt und Minuten lang gehört zu haben, wie auch die Empfindung der Schwebungen sich ihm leicht reproducirt. P. JACOBS¹⁶³ hat in ähnlicher Richtung Versuche angestellt.

Auch eigenthümliche Mitempfindungen kommen vor, wir erwähnten deren schon bei Besprechung der höchsten Töne. Ausserdem wird beobachtet, dass sich den Tönen und Accorden bei einzelnen Menschen lebhaftere Farbenempfindungen in der Art zugesellen, dass bestimmte Farben und bestimmte Töne zusammengehören.¹⁶⁴

160 WITTICH, Königsberger med. Jahrbücher. III. S. 40.

161 Eine ähnliche Beobachtung machte E. H. WEBER an sich, worüber MACH, Sitzgsber. d. Wien. Acad. 1864. Ueb. einige d. physiol. Akustik angehörige Erschein.

162 FESSEL, Ann. d. Physik. XXI. S. 189 u. 510. 1860. FECHNER, Ibid. S. 500. KNORR, Ibid. XXIII. S. 310. 1861.

163 P. JACOBS, De auditus fallacis. Dissert. Bonn 1832. (Mir nicht zugänglich.)

164 NUSSBAUMER, Wiener med. Wochenschr. 1873. No. 1—3.

VII. Gehörhallucinationen

sind im Traum häufig, auch werden plötzliche Empfindungen des Ohrs bei Tage oft dahin gedeutet, als werde gerufen, als sei an die Thür geklopft. Bei Irren sind Gehörhallucinationen vielleicht in Verbindung mit entotischen Geräuschen häufige und schwere Leiden.

VIII. Galvanische Reizung.

Das Ohr liegt der Anbringung von galvanischen Reizungen nicht günstig, wenig Stromeschleifen werden dem Endapparat oder dem N. acusticus zugeführt werden können und man kann nicht wissen, was bei den Versuchen gereizt wird. Constante Ströme geben bei genügender Stärke, namentlich wenn man die Kathode in den Gehörgang bringt, die Empfindung eines Klanges, sowohl bei Schluss wie bei Dauer des Stroms, doch werden dabei auch zischende und anderweite Geräusche empfunden, auch bleiben störende Nebenempfindungen nicht aus. Versuche bestimmte Regeln zu finden, nach welchen die Reaction beim gesunden, eventuell beim kranken Ohr, verlaufe, sind mehrfach gemacht worden, scheinen aber zu nicht befriedigenden Resultaten geführt zu haben.¹⁶⁵

VIERTES CAPITEL.

Die Gehörwahrnehmungen.

Es ist schon früher dargelegt worden, dass die Wahrnehmung des Klanges aus der Empfindung der Theiltöne hervorgehe. Letztere werden in den gewöhnlichen Fällen so vollständig unterdrückt, dass wir die Theiltöne garnicht bemerken, ja sogar die absolute Tonhöhe z. B. beim Sprechen, wenig beachten, sondern nur das *Zusammenwirken aller* als einen Klang bestimmter Farbe (und weiterhin den Wandel des Tonfalls) wahrnehmen. Aehnlich also, wie wir uns der bunten Flächen eines Feldes, einer Stadt, eines Gemäldes, nicht als

¹⁶⁵ Vgl. BRENNER, Arch. f. pathol. Anat. XXVIII. 1. u. 2 und besond. SCHWARTZE, TRÖLTSCHE'S Archiv I. 144.

farbiger Flächen bewusst werden, sondern sie sogleich als Gegenstände bestimmter Art auffassen, so nehmen wir auch die Theiltongruppen als Klänge wahr. Wir dürfen wohl annehmen, dass eine der zum Ohr gehörenden Sinnesflächen im Centralorgan die Theiltöne zu Gruppen vereint, zuweilen (Composition der Vokale durch Stimmgabeln) wider besseres Wissen, aber entsprechend den empirisch entweder früher oder mit Hülfe anderer Sinnesorgane gleichzeitig, als einheitlich erkannten, Klangquellen. Man darf vermuthen, dass ein von Geburt tauber Mensch, geheilt, in ähnlicher Weise das Hören lernen müsste, wie wir wissen, dass geheilte Blinde das Sehen lernen.

I. Consonanz und Dissonanz.

Unsere musikalischen Wahrnehmungen unterliegen noch in weiterer Beziehung gewissen Regeln. Es ist eine uralte Erfahrung, dass Toncombinationen, welche in einfachen Verhältnissen der Schwingungszahlen stehen; angenehm — consonant — andere, welche in complicirteren Verhältnissen stehen, wenig angenehm — dissonant — sind. Dies ist zwar dem Einen auffallender wie dem Anderen, aber es findet Niemand eine Consonanz dissonant. Die physikalisch-physiologische Erklärung dieser Thatsache ist von HELMHOLTZ ⁽⁶⁾ in der Art gegeben worden, dass er nachgewiesen hat, wie der Grad der Vollkommenheit eines consonanten Intervalls von dem Grade der Abwesenheit von Schwebungen bestimmt ist und wie die Rauigkeit, welche durch Schwebungen sich dem Klange beimischt das Gefühl der Lust und Unlust hervorruft. Wenn wir die Schwebungen zu den Geräuschen rechnen, können wir, da Zischen, Knallen u. s. w. ja auch die Musik nur stören, sagen, jeder Ton jede Tonfolge und jeder Accord ist um so consonanter und „reiner“, je freier er von Geräuschen ist. Das Gefühl der Unlust bei Dissonanzen, welches am stärksten bei 30 bis 40 Schwebungen die Secunde hervortritt, entspricht der starken und empfindlichen Erregung, welche die Nerven und Nervencentra bei intermittirenden Reizungen erleiden. So sind die Hautnerven empfindlich gegen Kitzel, das Auge leidet unter dem raschen Wechsel der LISSAJOUS'schen Tonfiguren zweier rasch schwebenden Stimmgabeln, und zwar kaum weniger wie das Ohr. Da wir die Vermuthung aufgestellt haben, dass die Otolithen der Apparat für die Empfindung und Wahrnehmung der Schwebungen und Stösse seien, so könnte man einwenden, dass deren Nerven durch den ihnen adäquaten Reiz doch wohl nicht so leicht ermüdet und überreizt werden würden. An sich ist jedoch eine unangenehme

Sensation auch bei ganz adäquatem Reiz nicht ausgeschlossen, denn die unangenehmen *Gerüche* sind doch gewiss als adäquate Reize zu betrachten, da die Fähigkeit, sie wahrzunehmen, gewiss eine erhaltungsmässige Function ist. Aber es kommt hier überhaupt ein Anderes in Betracht. Es müssen, wie früher erwähnt, Endapparate der Schnecke die Schwebungen mitmachen und es ist wahrscheinlich, dass ihre stossende, eine ruhige Abschätzung der Intensitäten nicht zulassende Bewegung es ist, welche das Gefühl des Missbehagens erweckt, nicht aber die nebenhergehende Schwingung des Otolithen.

HELMHOLTZ hat nachgewiesen, dass in allen Fällen der Dissonanz Schwebungen vorhanden sind und dass die Schärfe der Dissonanz ihren Höhepunkt bei dem Vorhandensein von 30 bis 40 Schwebungen erreicht. Dabei sind allerdings die Stosstöne z. Th. nicht mit berücksichtigt, aber dieselben würden wohl eher die Beweisführung von HELMHOLTZ erleichtern, wie erschweren, weil sie die Theiltöne entbehrlicher erscheinen lassen, als man bisher annahm.

Schon der einzelne Klang kann dissonant sein. So würde, abgesehen von etwa vorkommenden, unharmonischen Obertönen, C_1 von 33 *v. d* mit 33 Schwebungen scharf dissonant klingen, wenn der 15. und 16. Theilton, die das Verhältniss einer kleinen Secunde 15:16 geben, stark darin entwickelt wären. Bei unseren Toninstrumenten ist aber in der Regel der Theilton vom 6. an, möglichst schwach ausgebildet.

Die consonirenden Intervalle innerhalb der Octave sind 1:2 Octave, 2:3 Quinte, 3:4 Quarte, 3:5 gr. Sexte, 4:5 gr. Terz, 5:6 kl. Terz. Bei der Octave ist der 2., 4., 6. Theilton des niederen, identisch mit dem 1., 2., 3. des höheren Tons, der 3. und 5. des ersteren fallen im Verhältniss der Quinte und Terz zwischen die Theiltöne des höheren und geben deshalb keine oder nur schwache und rasche Schwebungen. Für die Quinte ist der erste gemeinsame Theilton der Ton $2 \cdot 3 = 6$, also der dritte des tieferen der 2. des höheren. Der 4. und 5. Theilton des tieferen, der 3. des höheren, stehen in dem Verhältniss von $\frac{9}{8}$ und $\frac{10}{9}$, also dem zweier benachbarter Töne zu einander. Dies Intervall ist schon so gross, dass nur in sehr tiefen Lagen der Grundtöne, bei stark entwickelten Obertönen eine Rauigkeit bemerkt werden könnte. Bei der Quarte haben wir die erste Coincidenz bei $3 \cdot 4 = 12$. Die Theiltöne sind für Ton 3

3.	6.	9.	12.	15.	18.
4.	8.	12.	16.		

also liegt das Verhältniss $\frac{9}{8}$ schon in tieferer Lage und $\frac{16}{15}$ giebt

ziemlich starke Schwebungen, die nur deshalb, weil der 5. und 4. Theilton schwach sind, wenig hervortreten. Die grosse Terz 4:5 hat 20 als erste Coincidenz

4.	8.	12.	16.	20.
5.	10.	15.	20.	

und $\frac{16}{15}$ schon beim 4. und 3. Theilton, ist also relativ viel rauher.

Die kleine Terz

5.	10.	15.	20.	25.
6.	12.	18.	24.	

hat $\frac{10}{9}$ schon im dritten Theilton, und die scharfe Dissonanz $\frac{25}{24}$ im 5. und 4. Theilton ist daher für tiefe Lagen wenig angenehm.

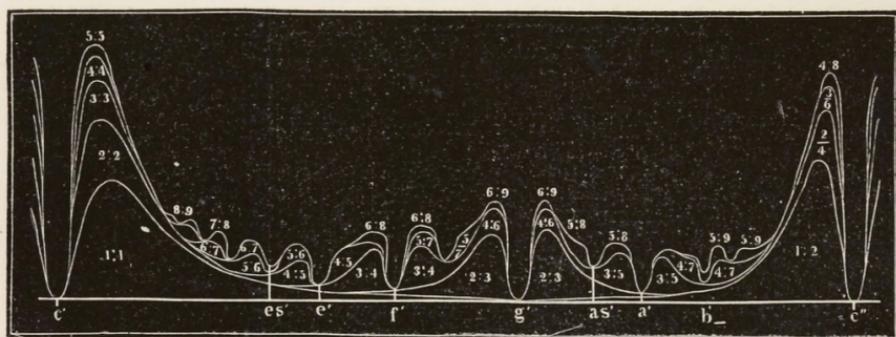


Fig. 31. A.

Sobald in diesen consonanten Verhältnissen kleine Verstimmungen auftreten, werden sogleich Schwebungen bemerklich, und zwar werden diese um so stärker, je vollkommener die Obertöne bei reiner

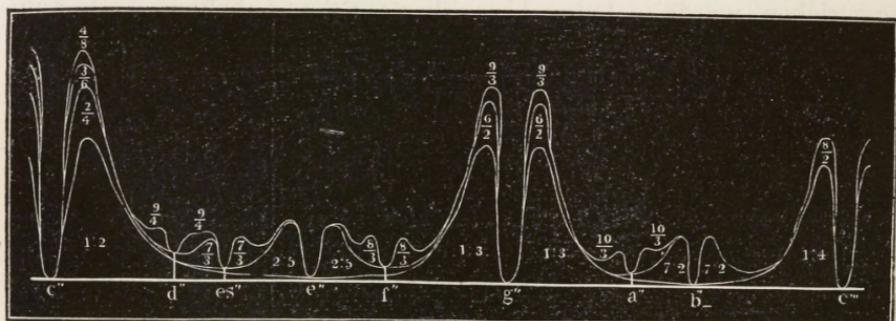


Fig. 31. B.

Stimmung coincidiren. Daher sind die reinsten Intervalle zugleich die empfindlichsten, was auch die vorstehenden Curven erkennen lassen.

Diese Curven geben die Rauhmigkeit aus der Höhe der Ordinaten.

Sie sind von HELMHOLTZ unter der Annahme berechnet, dass der Klang von der Violine herrühre, auf je zwei Fasern der Schnecke wirke und dass die Rauigkeiten existiren zwischen den Grenzen der Schwebungen $0 - \infty$, aber bei 30 Schwebungen ihr Maximum erreichen. Die Linien sind jedoch so dick, dass Schwebungsrauigkeiten von über 120 kaum hervortreten. Die den einzelnen *Theiltönen* entsprechenden Rauigkeiten sind für sich angegeben worden, wodurch ihr Einfluss deutlich hervortritt. Die Intervalle sind unter der Annahme genommen, dass c' mit 264 v. d. stets der Grundton sei. Wir finden die consonanten Orte in der durch die Horizontale dargestellten, zwei Octaven durchlaufenden Tonreihe für: kl. Terz, gr. Terz, Quarte, Quinte (!), kl. Sexte, grosse Sexte, verminderte Septime, Octave (!), None (schlecht), grosse None (es'' besser wie kleine Terz), Decime (e'' besser wie gr. Terz), Undecime (f'' schlechter wie die Quarte), Duodecime (sehr gut, aber bei Verstimmung stark dissonant), $c' b''$ zeigt sich als sehr reines Intervall. Man sieht, dass in den Tastaturinstrumenten ausser dem Ton b' und b'' , die für die beste Lage etwas zu hoch liegen, kein brauchbares Intervall mangelt, wenn man vom Grundton c ausgeht und die Stimmung rein ist.

Wäre als Grundton c''' 1056 v. d. genommen, so wäre das Bild ein anderes geworden, namentlich würde die Rauigkeit 1:1, also zwischen den Grundtönen nicht bis g , sondern nur bis d zu verfolgen gewesen sein, weil weiterhin über 120 Schwebungen eintreten würden.

PREYER¹⁶⁶ hat die Theorie von HELMHOLTZ mit Hülfe von 11 Stimmgabeln der Töne 1000, 1100 . . . 2000 geprüft. Die Obertöne dieser Gabeln waren zu hoch, um gut hörbar zu sein, da nur schwach angestrichen wurde. Jedes benachbarte Stimmgabelpaar gab 100 Schwebungen, musste also nach HELMHOLTZ's Theorie dissonant sein und wurde von den Musikern auch dafür erklärt. Alle anderen Combinationen 10:(13, 17, 19), 11:(13, 14, 15 . . . 20) erklärten Musiker für nicht dissonant, und obgleich zuweilen die reinen Intervalle bevorzugt wurden, war doch von einem sicheren Urtheil über Consonanz und Dissonanz, insofern das Verhältniss kleinster ganzer Zahlen dafür die maassgebende Grundlage sein sollte, nicht mehr die Rede. Es ist dies also ein schöner Beweis für die Richtigkeit der von HELMHOLTZ dargelegten Ansichten.*

166 PREYER, Die Theorie d. musikal. Consonanz. Sitzgsber. d. Jenaischen Ges. 28. Jan. 1878.

* PREYER (5. S. 41) hat diesem allerdings jetzt eine Beschränkung hinzugefügt. Paarweise vereinte Töne geben nämlich unter Umständen scharf dissonante Klänge, ohne dass Rauigkeiten dabei in Betracht gezogen werden können. Es dissoniren z. B. zwei Töne α von 1400 und β von 1600 Schwingungen, obgleich alle bei dem Zu-

Schwebungen entstehen übrigens noch leichter als es nach dem bisher Gesagten den Anschein hat, denn selbst wenn die Obertöne noch nicht schlagen, können schon die Differenztöne Schwebungen hervorrufen, und jeden schwebenden Ton hört das Ohr leichter als nicht schwebende Töne. Dies findet z. B. bei folgender etwas verstimmt Quinte statt

200 und 301 v. d. haben Obertöne von 400 und 602 v. d.

301—200 = 101 v. d. der Differenzton 1. Ordnung.

400—301 = 99 v. d. der Differenzton 2. Ordnung.

2 Schwebungen.

Sobald mehr wie zwei Töne zusammen erklingen, also bei den Accorden werden die Combinationstöne von grösserer Wichtigkeit für die Consonanz. In den folgenden Beispielen ist der Accord in halben Noten, der Combinationston der Grundtöne in Vierteln, die Combinationstöne mit den ersten Obertönen in Achteln und Sechzehnteln bezeichnet. Der Strich neben der Note bedeutet, dass dieselbe etwas tiefer ist wie der Scalenton.

sammenklang möglicher Weise entstehenden Töne um mindestens 200 Schwingungen von einander abstehen, also das Gefühl der Rauigkeit nicht entstehen kann, wegen der zu schnellen Folge der Schläge. Wir haben nämlich aus obigen Tönen mit ihren Obertönen Schwingungszahlen von: 200 ($\beta - a$), 400 ($2\beta - 2a$), 600 [$(2\beta - a) - (2a - \beta)$], 800 [$(2\beta - 2a) - (2a - \beta)$], 1000 [$2a - (2\beta - a)$], 1200 ($2a - \beta$), 1400, 1600, 1800 ($2\beta - a$), 2000 [$2\beta - (\beta - 2a)$], 2400 [$2a - (2\beta - 2a)$], 2600 [$2a - (\beta - a)$], 2800, 3000 [$2\beta - (\beta - a)$], 3200. Damit ist die Tonreihe erschöpft, sie giebt aber unzweifelhafte Dissonanz. Aehnliche Fälle, mit selbst noch weiteren Intervallen giebt es viele.

Es zeigt sich nun, dass bei den *consonanten* Intervallen ein grosser Theil der aufgezählten Toncombinationen mit den beiden ersten Theiltönen coincidirt, dass also die ganze Klangmasse bei den durch die Zahlen 1—5 auszudrückenden Intervallen wenige, aber stark entwickelte Töne enthält. Je mehr einfache Töne zugleich auf das Ohr wirken, um so weniger deutlich wird jeder einzelne Ton sein. Je mehr Coincidenzen unter den Tönen, die ein Intervall erzeugt, um so grösser die Befriedigung im Gefühle, je weniger Coincidenzen, um so verwirrender und darum unangenehmer der Eindruck. Dadurch würde sich also, selbst abgesehen von Rauigkeiten, nach PREYER die Dissonanz erklären lassen. Er fügt diesem die Hypothese hinzu, dass eine der harmonischen Theilung entsprechende, numerische Anordnung der Schneckenfasern anzunehmen sei, welche das Auffinden und Erlernen der Intervalle erleichtern müsse.

PREYER giebt also eine Erklärung für das positiv Angenehme der Consonanz, das gleichfalls positive Gefühl des Unangenehmen der Dissonanz lässt sich aber doch wohl mit geringer Modification im Sinne von HELMHOLTZ aufrecht erhalten. Wenn wir in den angeführten Fällen auch keine Rauigkeiten mehr wahrnehmen, so sind doch unzweifelhaft Schwebungen in der Luft vorhanden. Sollten diese in unserem Gehörorgan wirkungslos bleiben, während unser Tastorgan sie noch leicht empfindet? Wenn auch die Otolithen bei z. B. mehr als 130 Schwebungen wegen continuirlicher Erregung nichts mehr zur Wahrnehmung bringen, vorausgesetzt, dass sie die Empfindung des Rauhen auslösen, der Tonapparat wird doch beweglich genug sein, um die Schwebungen mitzumachen! Sollte letzteres nicht etwa das Unangenehme der Empfindung bewirken? Man könnte sogar behaupten, die Rauigkeit sei an sich dem Ohre ebenso wenig unangenehm, wie dem Auge, aber, da die Rauigkeit der Dissonanz immer von Schwebungen in der Schnecke begleitet werde, welche in der That, ähnlich wie flimmerndes Licht für das Auge, unangenehm wirken dürften, so werde den Rauigkeiten mit Unrecht das specifisch Unangenehme in der Dissonanz zugeschrieben, dies rühre von *unbewusster* Reizung der Schnecke her.

Durdreiklänge.*Molldreiklänge.*

In dem ersten Beispiel des Durdreiklangs haben wir die Töne:

Grundtöne	Differenzen	Obertöne	Differenzen	Differenzen zwischen Grund- u. Obertöne	
396	—	792	132 2 mal	396	198
330	66 2 mal	660	660	528 2 mal	264 2 mal
264	132	528	264	462	330

Es treten hier also 5 neue Töne auf, von denen zwei nahe und gleichmässig genug sind, um zu schlagen, dieselben sind aber nur sehr schwach. Wenn man die Beispiele in dieser Beziehung durchgeht, findet man, dass bei den Durklängen die Schwebungen nicht so leicht und von schwächeren Tönen aus entstehen, wie bei den Molldreiklängen, welche letzteren schon bei den Combinationstönen der ersten Obertöne Schwebungen geben. Deshalb sind die Mollaccorde geeignet, eine unklare, trübe und rauhe Stimmung auszudrücken und zu erregen. Freilich gilt das nur für reine Stimmungen, bei temperirter Stimmung leidet die Reinheit der Accorde überall.

HELMHOLTZ hat den Gegenstand sehr eingehend erörtert, es muss darüber auf sein Werk verwiesen werden. Mit Recht fordert er für den Gesang, die Urquelle der Musik, eine reingestimmte Begleitung, damit der Sänger aus den entstehenden Schwebungen die Fehler seiner Intonirung erkennen kann¹⁶⁷, und nicht durch Schwebungen im Instrument gestört wird. Jetzt kann er bestenfalls zwischen den verschiedenen schwebenden Tönen wählen, mit welchem Ton er ein reines

¹⁶⁷ Selbst eine wenig geübte Stimme schwebt nach A. KLÜNDER, Diss. Marburg 1872 weniger wie ein Mal die Sekunde.

Intervall bilden will; eine schwierige Aufgabe, die zugleich undankbar ist, weil befriedigende Reinheit dabei nicht herauskommen kann.

Die obige Lehre giebt für die Consonanz nur das negative Merkmal der Abwesenheit von Schwebungen.* OETTINGEN¹⁶⁸ fügt dem als positives Merkmal für die harmonische Bedeutung der Accorde und Intervalle, kurz für die Klangverwandtschaften, das Prinzip der Tonicität und Phonicität hinzu. Die *tonische* Verwandtschaft besteht in der Eigenschaft als Klangbestandtheil eines Grundtons, der als tonischer Grundton bezeichnet wird, aufgefasst werden zu können. Dieser Ton bestimmt, wie wir in der Einleitung sahen, auch die Wellenlänge der Klangcurve. Für das Intervall (c g) ist der tonische Grundton C, für den Dreiklang c e g ist er ein Unterton von C, nemlich C₁. Der Dreiklang besteht aus dem 4., 5. und 6. Theilton von C₁. Durch den tonischen Grundton und dessen nähere Untertöne treten die verschiedenen Zusammenklänge in *tonische Verwandtschaft*.

Phonicität ist die Eigenschaft eines Accordes oder Intervalls, stets irgend welche, allen Tönen gemeinsame Partialtöne zu besitzen. Der tiefste der allen gemeinsam zukommenden Partialtöne ist der phonische Oberton. Alle Töne singen diesen Oberton mit und er mag deshalb ziemlich stark hervortreten. c g hat als phonischen Oberton g' und die Reihe von dessen Theiltönen gemeinsam.

Es findet nun eine eigenthümliche Reciprocität statt zwischen den Moll- und Dur-Klängen:

Dur. c e g hat zum tonischen Grundton C₁ = $\frac{1}{4}$ c zum phonischen Oberton h''' = 15 c
Moll. c e s g hat zum phon. Oberton g'' = 4 g zum tonischen Grundton $\underline{\text{A}}_{s,111}$ = $\frac{1}{15}$ g
und diese reciproke Symmetrie lässt sich durchgehend nachweisen, ist gesetzlich. Es scheint überhaupt, dass die Mollaccorde eine engere Beziehung zum phonischen Oberton, die Duraccorde zum tonischen Unterton haben.

Es kann hier jedoch ebensowenig auf das Gebiet der Musik, wie auf das der Rhythmik eingegangen werden. Nur auf einen Punkt dürfte noch aufmerksam zu machen sein.

Durch die neueren Untersuchungen in der Musik tritt uns immer deutlicher entgegen, dass wir mit Bezug auf Tonfall und Rhythmik unter recht scharfem Zwang physikalisch-physiologischer Gesetze stehen. So lange der Componist das Recht hat, uns zu leiten wie er will, tritt dieser Zwang weniger hervor. Soll aber eine auch dem Hörer sicher und im Voraus bekannte Absicht erreicht werden, so zeigt sich der Zwang deutlich. Dies findet namentlich dann

* Und nach PREYER: beschränkter Anzahl von Tönen.

168 A. v. OETTINGEN, Harmoniesystem in dualer Entwicklung. Dorpat u. Leipzig, Gläser. 1866.

statt, wenn ein Schluss gemacht werden soll. Dabei müssen besonders Leittöne und Tonica genau beachtet werden, sonst kommt vieles Andere, aber kein befriedigender Schluss zu Stande.

Dasselbe findet für Tonfall und Rhythmus unserer Sprache statt, und hier in einer auch für unmusikalische Menschen sehr auffallenden Weise. Die Worte: kommen wir zum Schluss! können beispielsweise als Einleitung des Schlusses einer Rede nur in *einer* Weise gesprochen werden; Aenderungen des Tonfalls oder des Rhythmus können in verschiedener Weise angebracht werden, ändern und modificiren dann aber den Sinn jener Phrase, und diese Aenderung ist zwingend und erregt sogleich die Aufmerksamkeit in bestimmter Richtung.

II. Zeitsinn des Ohrs.

Ueber die Fähigkeit des Ohrs, Zeitunterschiede wahrzunehmen, haben wir von HÖRING¹⁶⁹, MACH¹⁷⁰ und VIERORDT¹⁷¹ einige Bestimmungen. Takte werden von dem Ohr feiner wie von den anderen Sinnen unterschieden. Geprüft wurde namentlich der Taktschlag von Metronomen und Pendeln, sowie von Zahnrädern. Das Urtheil wird bei Pausen von weniger als 0,3 Sec., rasch zunehmend mit Verringerung der Zeit, unsicher. Für 0,3 Sec. wurde ein Unterschied von 3,3 % resp. 5 % noch erkannt, bei langsamer Schlagfolge werden die Fehler in der richtigen Erkenntniss des Taktes grösser, für 1,4 Sec. steigen sie etwa auf das doppelte. Bei Versuchen, die Schlagfolgen zu reproduciren, ergab sich, dass kurze Perioden zu lang, lange zu kurz angegeben wurden; das Urtheil zeigte also nicht nur eine gewisse Unsicherheit, sondern es war auch noch mit einem „constanten Fehler“ behaftet. Der Indifferenzpunkt, bei welchem dieser Fehler fortfällt, liegt verschieden, je nach der Individualität; bei drei Personen traf VIERORDT ihn bei Perioden von 1,5, 1,4 und 3 Secunden.

III. Raumwahrnehmung.

Während Geisteskranke geneigt sind, Binnengeräusche des Ohrs nach aussen zu verlegen, wissen sich Gesunde leicht und mit wenig Mühe vor dem Irrthum zu wahren. E. WEBER⁽⁶⁵⁾ glaubte, dass dies, und überhaupt die Orientirung über die Richtung der Schallquelle, mit Hülfe eines Gefühls von der Schwingung des Trommelfells erreicht werde. Er fand nemlich, dass man die Richtung, von welcher

169 HÖRING, Dissertat. Tübingen 1864.

170 MACH, Unters. üb. d. Zeitsinn d. Ohrs. Sitzgsber. d. Wien. Acad. Febr. 1865. S. 133.

171 VIERORDT, Zeitsinn. Tübingen 1868. Laupp.

der Schall komme, nicht mehr unterscheiden könne, sobald (im Wasser) die Trommelfellbewegung durch Füllung der Gehörgänge mit Wasser verhindert sei. SCHMIDKAM⁽⁸⁾ konnte dieser Ansicht nicht beipflichten, da im Wasser die Richtung, in welcher der Schall kommt, schon nicht mehr zu unterscheiden ist, wenn man ohne Füllung der Gehörgänge untertaucht. So völlig lässt sich überhaupt die Luft aus den fettigen Gehörgängen nicht entfernen, um das Trommelfell ganz am Schwingen zu hindern.

Es ist jedoch sicher, dass unterschieden wird, welches Ohr den Schall resp. den stärkeren Schall empfängt. Dies ist eins der Mittel, welche namentlich mit Hilfe von Kopfwendungen gestatten, sich im Raume zu orientiren. Von RAYLEIGH¹⁷² sind unter guten Vorsichtsmassregeln am Abend Versuche an einem freien, stillen Platz mit sechs umgebenden Assistenten angestellt worden. Es zeigte sich, dass durchstehend ein Wort und Vokal, wenn in natürlicher Stimme gesprochen wurde, genügte, um die Richtung der Tonquelle bis auf wenige Grade genau angeben zu können. Anders verhielt es sich mit Tönen, welche nicht von Geräuschen begleitet waren. An welcher Stelle von zwei zugleich angeschlagenen Stimmgabeln die eine vor den Resonanzkasten gehalten wurde, konnte nicht unterschieden werden, wenn es sich um vorn und hinten, wohl aber wenn es sich um rechts und links handelte.

Der hierbei in Betracht kommende akustische Schatten ergibt sich aus dem Verhältniss Wellenlänge: Kopfumfang = α (die Vorrangung der Ohren nicht mitgerechnet?) wie folgt

	vorderer Pol	hinterer Pol	Aequator
$\alpha = 2$	0,690	0,318	0,356
$\alpha = 1$	0,503	0,285	0,237
$\alpha = \frac{1}{2}$	0,294	0,260	0,232

$\alpha = \frac{1}{4}$ giebt zwischen den beiden Polen (Ohren) nur einen Intensitätsunterschied von 1%. Da nun eine Stimmgabel von 128 v. d. welche diesem α entspricht noch richtig localisirt werden konnte, müsste man schliessen, dass bei solchen Untersuchungen die Intensitätsunterschiede genauer gewürdigt werden, als dies bisher die directen Experimente ergeben wollten. KRIES und AUERBACH⁽¹²³⁾ haben eine Reihe von Versuchen gemacht, um die Zeitdauer zu bestimmen, welche zur Localisation eines Schalls erforderlich ist. Auf der Peripherie eines Kreises von e. 60 Cm. Radius, in dessen Centrum der Kopf sich befand, wurden zwei Elektrodenpaare aufgestellt, zwischen denen der

172 RAYLEIGH, Nature. Vol. XIV. p. 32.

Funke überschlug. Die Stellungen wechselten von 120° (also zur Seite jedes Ohrs) bis zu 11° Abstand. Es musste entschieden werden, an welcher der beiden Elektroden das Geräusch entstand. Bei 120° Abstand verzögerte sich die Reaction durch die Entscheidung um 0,015—0,032 Sec., unter den ungünstigeren um 0,053—0,044 Sec.

Es lässt sich kaum verkennen, dass so genaue und prompte Localisationen sich nicht recht befriedigend aus dem akustischen Schatten, — der Intensitätsschätzung — erklären lassen. Es kommt eine eigenthümliche Beobachtung von TARCHANOFF¹⁷³ hinzu, nach welcher bei dem Hindurchleiten intermittirender Ströme durch an beide Ohren gehaltene Telephone, der Ton genau in die Medianebene des Kopfes verlegt wird und bei kleinsten Intensitätsdifferenzen sich etwas aus derselben verschiebt. Man wird immer wieder veranlasst an die eigenthümliche Anordnung der halbcirkelförmigen Kanäle in drei aufeinander senkrechten Ebenen zu denken und sich zu fragen ob diese Bildungen etwas mit der Localisation im Raum zu thun haben könnten. Wenn man, abgesehen von der craniotympanalen Leitung ein Hören durch die Schädelknochen annehmen will, obgleich das Vorkommen dieses Processes nicht erwiesen ist, und selbst wenn man mit der grössten Freiheit über den Gang der akustischen Welle durch die Theile des Schädels disponirt, eröffnet sich keine weitere physikalisch-anatomische Möglichkeit für die Wahrnehmung der Richtung der Tonquelle durch die Kanäle. Die wenigen Autoren, welche von dieser Möglichkeit sprechen, haben daher auch keinerlei ernstliche Nachweise darüber gegeben, wie sich über den physikalischen Vorgang eine Vorstellung gewinnen lasse.

Die Schätzung der Entfernung scheint nur bei bekannten Klängen möglich zu sein. Hier mag vielleicht in Betracht kommen, dass nach GRINWIS¹⁷⁴ die Intensität der Obertöne* in grosser Entfernung gegen diejenige des Grundtons erheblich zunimmt und zwar im Quadrat ihrer Reihennummer, der p^{te} Oberton gewinnt eine verhältnissmässige Intensität gegen den Grundton bis zu p^2 der q^{te} bis zu q^2 u. s. w. Da der Klang also nicht nur leiser wird, sondern auch das Verhältniss der Partialtöne sich ändert, so kann daraus ein Urtheil über die Entfernung entnommen werden. Indem MACH⁽¹⁷⁵⁾ mit Hülfe einer NÖRENBERG'schen Röhre den Grundton schwächte, schien ihm der Ton einer Stimmgabel, und mehr noch der einer

173 TARCHANOFF, St. Petersburger med. Wochenschr. No. 43. 1878. Mir nur aus Referaten bekannt. Die Beobachtung ist von PREYER, Jen. Sitzgsber. 21. Febr. 1879, bestätigt worden.

174 GRINWIS, Ueb. cylindr. Schallwellen. Ann. d. Physik. 1877. Beibl. S.

175 MACH, Ebenda. CXXIV. S. 331.

menschlichen Stimme, aus grösserer Entfernung herzukommen. Er erklärt die Aenderung des Klanges bei Entfernung aus der Annahme, dass bei Vermehrung der Intensität die Empfindung der tieferen Töne, bei Verminderung der Intensität die Empfindung der höheren Töne überwiege.

ANHANG.

Experimente an den halbcirkelförmigen Kanälen.

Eine von FLOURENS¹⁷⁶ 1828 gemachte und vollständig u. A. von CZERMAK¹⁷⁷ und VULPIAN¹⁷⁸ bestätigte Beobachtung eigenthümlicher schüttelnder und drehender Kopfbewegungen, welche nach Verletzung der halbcirkelförmigen Kanäle eintreten, hat in Folge einer von GOLTZ¹⁷⁹ über diese Erscheinungen aufgestellten Hypothese zu einer grossen Zahl von Versuchen und Aeusserungen geführt.

Am meisten wurde an Tauben experimentirt, nächst dem an Fröschen, Kaninchen und Fischen.

Bei älteren Tauben entfernt man unterhalb des Ansatzes der Nackenmuskeln die äussere Lamelle des Occiputs; die Bogengänge liegen in dem spongiösen Gewebe frei vor, man eröffnet eine kleine Stelle in denselben und durchschneidet dort den häutigen Kanal. Häufig ist jedoch die Durchschneidung weniger schonend und mit Verletzung hier liegender grosser Venen, sowie des Aquaeductus vestibuli geschehen. Bei Fröschen können die Kanäle mit sehr geringer Verletzung sonstiger Theile durchschnitten werden, bei jungen Kaninchen dagegen muss man auf die Fläche des Felsenbeins, also mindestens an die Dura herangehen. Genaue Beschreibung der Operationen geben BÖTTCHER¹⁸⁰, CYON¹⁸¹ und ANNA TOMASEWICZ.¹⁸²

Die Erscheinungen welche man beobachtet sind zu beziehen auf die directe Verletzung des knöchernen und häutigen Bogenganges, Verletzung und Erkrankung des Kleinhirns und auf die, in Folge

176 FLOURENS, Compt. rend. 1828 u. 1861. I. p. 673; ferner *Recherches experimentales sur les propriétés d. syst. nerv.* p. 438. 1842.

177 CZERMAK, *Jenaische Ztschr.* III. S. 101. 1867.

178 VULPIAN, *Leçons*, Paris. 1866. S. 600.

179 GOLTZ, *Arch. f. d. ges. Physiol.* III. S. 172. 1870.

180 BÖTTCHER, a) *Kritische Bemerkgn. z. Literatur d. Gehörlabyrinths.* Dorpat Gläser. 1872. S. 12. (Frosch.) b) *Tröltsch's Arch.* IX. S. 1. (Taube.)

181 CYON, *Methodik der physiol. Experimente.* S. 540. Giessen, Ricker. 1876.

182 TOMASZEWICZ, *Beiträge zur Physiologie d. Ohrlabyrinths.* Diss. Zürich 1877.

des Traumas gesetzte, Aenderung in Haltung und Beweglichkeit des Kopfes. Es ist schwierig die verschiedenen Wirkungen und Nachwirkungen dieser Dinge auseinander zu halten. Trotz ausgiebigen Studiums der Literatur, und trotz eigener, seit 10 Jahren gemachter Erfahrungen, kann ich die für eine Schlussfolgerung genügende Basis nicht gewinnen. Am eingehendsten hat BÖTTCHER die Versuche durchgeführt und auch er findet dass an einen Abschluss noch nicht zu denken sei.

Die Vorbereitung der Operation führt nicht oder nicht sogleich zu auffallenden Erscheinungen, jedoch genügt nach BERTHOLD¹⁸³ das Abfliessen der Perilymphe, um die, auch von anderen (BORNHARDT¹⁸⁴, CYON) beobachtete Unsicherheit des betreffenden Beins bei Tauben zu veranlassen. Druck oder Zug an dem häutigen Kanal, der also die Endolymphe bewegt, bewirkt nach BORNHARDT⁽¹⁸⁴⁾ starkes Abdrehen des Kopfes mit etwas pendulirender Bewegung, und zwar beim horizontalen Kanal nach der Seite, beim hinteren verticalen Kanal nach unten. Nach der Durchschneidung hören diese Bewegungen auf oder gehen in entgegengesetzter Richtung vor sich.

Einseitige Durchschneidungen pflegen nur beim Kaninchen anhaltende Bewegungen hervorzurufen, welche neben einem Schwanken des Kopfes und Vorderkörpers in auffallenden Wendungen der Augen bestehen. CYON¹⁸⁵ besonders hat dieselben studirt und findet, dass Anfälle kürzerer oder längerer Dauer auftreten, in denen die Augen 20 bis 150 mal die Minute oscilliren. Die Durchschneidung des horizontalen Kanals führt die Augen nach vorn und unten, die der verticalen Kanäle nach hinten und oben. Die Oscillationen der Augen gehen beiderseits in entgegengesetztem Sinne vor sich, und nicht wie beim Nystagmus in demselben Sinne. Nach Durchschneidung des Nerv. acusticus der anderen Seite hören die Oscillationen auf und es bleibt nur eine Spannung in den genannten Richtungen. Das freigelassene Thier zeigt Rotationen um die Längsaxe und überhaupt schwere Bewegungsstörungen, die bei beiderseitiger Durchschneidung grösser und wechselnder zu werden scheinen.

Tauben geben erst bei doppelseitiger Durchschneidung schwerere Störungen. Namentlich sind oscillatorische Bewegungen des Kopfes (neben zeitweiser Augenverdrehung) das constanteste Symptom. Diese Oscillationen werden so heftig, dass der Rumpf davon mit ergriffen wird, das Thier umfällt und heftigste unbeholfene Bewegungen macht.

183 BERTHOLD, TRÖLTSCHE'S Arch. IX. S. 77. 1875.

184 BORNHARDT, Arch. f. d. ges. Physiol. XII. S. 471. 1876.

185 E. DE CYON, Ebenda 1863. Compt. rend. 1876 u. 77 und namentlich: Recherches s. l. fonctions d. canaux semi-circulaires. Thèse No. 114. Paris 1878.

Das merkwürdigste dabei ist, dass die Bewegung bei Durchschneidung beider horizontalen Kanäle in Hin- und Herdrehungen des Kopfes in horizontaler Ebene besteht, bei Durchschneidung der verticalen dagegen der Kopf in der verticalen Ebene dreht. Sind die vorderen unteren Kanäle durchschnitten, so geht das Thier bei starken Anfällen rückwärts über, bei Durchschneidung der hinteren Kanäle vorwärts kopfüber. Die Bewegungen können so lange andauern bis das Thier erschöpft ist und können durch künstliche Fixirung des Kopfes beruhigt werden, bis eine stärkere oder stossweise Bewegung sie wieder hervorruft.

Zu diesen Bewegungen können sich früher oder später ausserordentliche Verdrehungen des Kopfes gesellen, wobei dann die Pendelbewegungen sistiren; ferner Störungen des Gangs, Manège oder Rotationsbewegungen, Schwäche eines Beins oder eines Flügels, oder beides, und natürlich Flugunfähigkeit. Gewöhnlich können die Thiere das Futter nicht selbst nehmen, sondern picken vorbei, auch ist Erbrechen beobachtet. Bei so stark entwickelten Erscheinungen gehen sie meistens zu Grunde. In diesen schwereren Fällen wurde so häufig ein Ergriffensein des Kleinhirns direct nachgewiesen (¹⁸²), dass dasselbe dabei wohl immer angegriffen gewesen sein dürfte.

In anderen Fällen sind dagegen die Störungen ziemlich unbedeutend, die Pendelbewegungen verlieren sich nach einer Woche und die Thiere werden wie normale. Nach BÖTTCHER können die pendulirenden Drehungen des Kopfes sogar ganz ausbleiben, die Flugfähigkeit kann ausser gelegentlichem Tummeln gut sein und bald volle Genesung eintreten.

Zuweilen treten erst Stunden nach der Durchschneidung die Bewegungen ein, was ich häufig beobachtet habe.

Bei Fröschen zeigen sich die Folgen der Durchschneidung am ruhig sitzenden Thier kaum, oder nur in einer nicht im Voraus zu bestimmenden Drehung des Kopfes, beim Sprung deviirt das Thier, nach der Seite bei Verletzung der horizontalen, in die Höhe und rückwärts bei Verletzung der verticalen Kanäle. Beim Schwimmen steht es aufwärts in letzterem, schwimmt im Kreise in ersterem Fall. Fische zeigen ähnliche Verhältnisse.

Durchschneidung mehrerer oder ungleichnamiger Kanäle compliciren das Bild, ohne mehr Aufschlüsse zu geben. Die Thiere sollen nach Durchschneidung oder Entfernung der halbeirkelförmigen Kanäle noch hören können, während nach FLOURENS bei Entfernung der Schnecke Taubheit eintritt. Ob nicht in letzterem Fall die mechanischen Bedingungen des Hörens so verändert worden sind, dass kein

Schall mehr in das Labyrinth dringen kann, oder ob andererseits im ersteren Fall, durch Entzündung empfindlich gewordene Theile eine Schallerregung vortäuschen, dürfte noch nicht ganz sicher gestellt sein.

Von GOLTZ ist bemerkt worden, dass sich nach der Operation das Gleichgewicht der Thiere gestört erweise, ähnlich wie bei Thieren, welchen der Kopf in verdrehter Haltung fixirt wird oder denen die Muskeln des Nackens so stark verletzt wurden, dass die Kopfhaltung eine abnorme geworden war. Es bleibe dahingestellt, ob die Bogengänge Gehörorgane seien, ausserdem aber bildeten sie eine Vorrichtung, welche der Erhaltung des Gleichgewichts diene; sie seien sozusagen Sinnesorgane für das Gleichgewicht des Kopfs und mittelbar des ganzen Körpers.

Die Grundlage für diese Annahme hat sich als nicht haltbar erwiesen, denn die Verdrehung des Kopfes der Tauben ist als Hirnerscheinung anerkannt und die Störungen des Gleichgewichts der Frösche, wie GOLTZ sie beschrieben hat, findet sich nach BÖTTCHER bei gut operirten Thieren sicher nicht. GOLTZ ist der Ansicht, dass die Vertheilung des Drucks in den Bogenkanälen, die je nach Lage des Kopfes ein wenig verschieden ist, die Ursache der Wirkung der Kanäle auf die Erhaltung des Gleichgewichts sei. Diese Ansicht hat durch Arbeiten von MACH¹⁸⁶, BREUER¹⁸⁷ und CRUM BROWN¹⁸⁸ eine Modifikation und weitere Entwicklung erfahren. Es würde sich nicht nur um Druckgefühle handeln, sondern, ähnlich wie die Flüssigkeit in einem gedrehten Glase sich nicht gleich mit dreht, würde die Endolymphe die, den Kanälen vom Kopfe aus ertheilten Bewegungen nicht gleich mitmachen, und es würde demgemäss Reibung an den Wänden (Biegung der Härchen) entstehen müssen, wenn eine Beschleunigung oder ein Bewegungsantrieb die Kanälchen trifft. Wenn jedoch fraglich erscheint, ob die Flüssigkeit in so engen langen Kanälchen bei den in Betracht kommenden schwachen Beschleunigungen in Bewegung kommt, so wird dabei doch jedenfalls eine Aenderung in der Pressung der Flüssigkeit gegen die Wandungen zu erwarten sein. Diese Vorgänge treten in starker und durch andere Gefühle kaum controlirter Weise beim Schwindel nach Drehbewegungen ein, und während die dabei auftretende Störung des Gleichgewichts auf die Erregung in den halbcirkelförmigen Kanälen bezogen wird, erklären sich umgekehrt die Erscheinungen bei Durchschneidung der Kanäle aus der Abnormität der dann eintretenden Druck- oder Bewegungsempfindungen.

186 MACH, Versuche üb. d. Gleichgewichtssinn. Sitzgsber. d. Wiener Acad. Nov. 1873. Derselbe, Grundlinien d. Lehre v. d. Bewegungsempfindungen. Leipzig 1875.

187 BREUER, Jahrbücher d. Ges. d. Aerzte. Wien 1874 u. 75.

188 CRUM BROWN, On the sense of rotation. Journ. of Anatomy and Physiol. VIII.

Gegen diese Ansichten, die ja theoretisch wohl begründete sind, macht CYON⁽¹⁸⁵⁾ geltend, dass die Thiere bei Durchschneidung des N. acusticus nach Rotationen noch durchaus dieselben Schwindelercheinungen zeigen, wie wenn sie intact wären. Es würden also doch die Druckdifferenzen keine solche physiologische Bedeutung für das Schwindelgefühl und somit für die Erhaltung des Gleichgewichts haben, als man anzunehmen geneigt war. Auch TOMASZEWICZ hat in zahlreichen Versuchen gefunden, dass die Schwindelercheinungen völlig unabhängig von den verschiedenartigsten Eingriffen auf das Labyrinth sind.

CYON stellt die Ansicht auf, dass wir in den Kanälen ein Organ für den Raumsinn besitzen. Er findet, dass die nervösen Centren der halbcirkelförmigen Kanäle in inniger Beziehung zu dem Centrum des Oculomotorius stehen, und daher ihre Reizung in entscheidender Weise in die Bildung unserer Erfahrungen über das Vorhandensein und die Dimensionen des Raums eingreifen kann; namentlich vermöge der Lage der Bogen, welche einigermaassen den drei Coordinaten des Raums entsprechen. Wenn ich die Ansicht CYON's richtig verstehe, würde also durch die Gefühle in den Kanälen für unseren Kopf und folglich den ganzen Körper der festgelegte 0-Punkt der drei Coordinaten des Raums geschaffen werden, von dem aus man den Raum mit Hilfe der Sinnesorgane und deren Bewegungen durchforschen kann. Die von CYON angewendete Bezeichnung „*notion de l'espace*“ wäre dann etwa als „Bewusstsein unserer Lage im Raum“ zu übersetzen. Durch die Gefühle in den halbcirkelförmigen Kanälen würde also der Theil unseres Selbstbewusstseins eine Erklärung finden, welcher es bewirkt, dass wir nach unserem ursprünglichen Gefühl uns als Mittelpunkt erscheinen, um welchen sich alle Körper drehen. Wir kennen aber bis jetzt keinen Fall, wo dies Gefühl nicht vorhanden oder verloren gegangen wäre, während die halbcirkelförmigen Kanäle muthmaasslich bei Taubstummen nicht immer functionsfähig sind und in der That derartige Befunde schon verzeichnet sind.*

Es werden unter dem Namen der MENIÈRE'schen Krankheit¹⁸⁹ Leiden beschrieben, welche (als eine Art von Ohrenglaukom) Taubheit und Schwindelgefühle mit, sofern den ja sehr schwierigen Sectionen zu trauen ist, Erkrankung des Labyrinths, nachweisen. Soweit ich mich habe orientiren können, trage ich Bedenken, daraus Thatsachen und Schlüsse für die Physiologie zu entnehmen.

Es kann zweifelhaft sein, ob die Durchschneidungen zu Lähmun-

* Compt. rend. XXXI. p. 569.

189 MENIÈRE, Gazette médicale de Paris. p. 29, 25, 88, 239, 379, 597.

gen oder zu Reizungen führen. LÖWENBERG¹⁹⁰ hat, mit Hülfe der schon von FLOURENS benutzten Exstirpation des Grosshirns oder mit Hülfe der Narkose, also den Willen des Thiers ausschliessend, gefunden, dass es sich bei den Pendelbewegungen um Reizungserscheinungen reflectorischer Art handelt. Dieselben treten auf als unmittelbare Folge des Eingriffs und wenn äussere Anstösse reizend wirken. Wir dürfen mit BREUER die Reizungen durch den Ausfluss der Endolymph e gesetzt denken, denn dabei wird die Flüssigkeit an der Crista acustica vorbeiströmen. In der That nässt die Wunde geraume Zeit hindurch. Die Pendelbewegungen sind, wenigstens für den horizontalen und äusseren Kanal der Art, dass sie dem Ausfluss und dessen Folgen entgegen wirken, wenn aber *beide* horizontalen Kanäle durchschnitten sind, so beschleunigt die Drehung für den einen Kanal die Bewegung der Flüssigkeit um ebensoviel, wie sie dieselbe im anderen Kanal hemmt, während der Ausfluss für die Vertikalkanäle zum Ueberkugeln führen muss. Dabei ist es gleichgültig, ob die gesetzten Empfindungen Geräusche sind oder sonst peinliche Gefühle. Jedenfalls scheint es nothwendig, eine Beziehung zwischen gewissen Muskelgruppen und den Ampullennerven anzunehmen.

Als Besonderheit sind noch Beobachtungen über dauernde Aenderung der Kopfhaltung bei Mangel des Labyrinths zu erwähnen. VULPIAN^(177. S. 602) beschreibt eine solche von einem Hahn und ausführlicher MUNK¹⁹¹ von einer Taube, bei welcher rechts nicht die mindeste Spur der Bogengänge vorhanden war, welche sich links normal verhielten. Ueber 6 Monate lang war bei der Taube der Kopf 90° um die sagittale Axe nach rechts, 45° um die verticale Axe nach links herumgedreht. Der Schnabel stand nach links und vorn, das rechte Auge sah gerade nach oben, das linke nach unten. Die Taube konnte nicht fliegen, war aber sonst normal. Der Hahn hatte sich die Verletzung im Kampf zugezogen, über die Vorgeschichte der Taube war nichts zu ermitteln, ihr Tod erfolgte plötzlich. Es ist bis auf Weiteres vielleicht zu glauben erlaubt, dass in diesen Fällen unbenutzt gebliebene Störungen im Gehirn die Erscheinungen mit verursacht haben, da bei Zerstörung des Acusticus einer und beider Seiten von solchen Symptomen nichts beobachtet ist.^{192 (182)}

190 LÖWENBERG, Arch. f. Augen- u. Ohrenheilkunde. III. 1872.

191 MUNK, Verh. d. physiol. Ges. 16. Juli 1878. Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1878.

192 SCHIFF, Lehrb. d. Physiol. S. 399. Lehr, Schauenburg. 1858/59.