

## Die Empfindlichkeit des Ohres.

Von

H. ZWAARDEMAKER in Utrecht.

Die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres ist in den Mitteloktaven außerordentlich groß. Luftschwingungen von so verschwindend kleiner Amplitude, daß die heutige Physik uns kein Mittel hergibt, um sie sichtbar zu machen, verursachen einen lauten Schall. Es hat nicht an Schätzungen dieser ungemein kleinen Energiemengen gefehlt. Die Töne z. B., zu deren Beobachtung das Sinnesorgan am besten geeignet ist, werden bereits hörbar, wenn eine Schallmenge weniger als  $\frac{1}{100\,000\,000}$  eines Ergs in unser Ohr gelangt. Wenn man sich nun vergegenwärtigt, daß ein Erg selber bereits eine sehr kleine Einheit ist und nicht mehr als  $\frac{1}{42\,000\,000}$  einer Gramm-Kalorie entspricht, kommt man wirklich zu einer minimalen Größe, unendlich viel kleiner z. B. als die Verbrennungswärme eines Körnchens einer chemischen Verbindung. WIEN hat diesem Verhalten Ausdruck gegeben, indem er sagte, wir würden einen Grashalm wachsen hören können, wenn wir nur über Mittel verfügten, um seine dabei aufgespeicherte Energie in Schall überzuführen.

Nicht überall in der Skala aber ist das menschliche Ohr so außerordentlich empfindlich. Sobald man das Gebiet der in der Musik verwendeten Tonhöhen ( $C^{-1} - f^5$ ) verläßt, nimmt die Empfindlichkeit rasch ab und in der Nähe der Grenztöne sind sogar bedeutende und physikalisch leicht demonstrierbare Energiemengen sensorieell unwahrnehmbar.

Die äußersten Grenzen der menschlichen Tonleiter habe ich früher auf  $E^{-3}$  und  $e^7$  bestimmt.<sup>1</sup> Die untere dieser beiden

---

<sup>1</sup> H. ZWAARDEMAKER: *Ned. Tydschr. v. Gen.* 2, S. 737; 1890. — *Archiv f. Ohrenheilk.* 32, S. 53; 35, S. 299.

Grenzen läßt sich jetzt nicht mehr aufrecht halten, denn VAN SCHAİK<sup>1</sup> hat seitdem dargetan, daß so ausgiebige Schall-schwingungen als hier erforderlich sind, notwendig zur Bildung von Obertönen in der Luft Veranlassung geben auch dann, wenn die Schall erzeugende Lamelle, wie in unserem Falle, ursprünglich reine Sinusschwingungen ausführt. Wahrscheinlich also ist nicht  $E^{-3} = 10$  Schwingungen, sondern  $E^{-2} = 20$  Schwingungen in unseren Versuchen der wirkliche Grenzton gewesen, was mit dem an reinen Intermittenztönen erworbenen Resultaten SCHÄFERS übereinstimmt.<sup>2</sup>

Der obere Grenzton  $f^7$  ist wahrscheinlich richtig. Er ist wenigstens der höchste Ton der praktisch mit reinen Schall-quellen (Klangstäbe, Stimmgabeln) erreicht worden ist. Zwar glaubt EDELMANN<sup>3</sup> mit seiner Galtonpfeife noch höhere hörbare Töne hervorgebracht und damit sogar KUNDTSche Staubfiguren bekommen zu haben, aber jene Versuche haben der Kritik C. S. MYERS'<sup>4</sup> nicht standgehalten. Will man vollkommen sicher gehen, so hat man  $f^7$  als höchst hörbaren Grenzton anzunehmen.<sup>5</sup>

Wir wollen versuchen die Energiemenge, welche den Schall-quellen dieser Grenztöne innewohnt, abzuschätzen.

**Unterer Grenzton.** Man denke sich einen Ton von 20 doppelten Schwingungen durch eine APPUNNSche Drahtgabel hervorgerufen. Das lauschende Ohr befinde sich in der Symmetrieebene auf 5 cm vom Rande der schwingenden Scheibe in einer Richtung normal auf die Schwingungsebene. Mittels eines angeklebten Schreibstiftes registriere die Gabel ihre Ausschläge auf dem horizontalen rotierenden Zylinder eines Kymographions. Unter diesen Umständen bestimmte ein mit normaler Hörschärfe begabter Arzt die seiner Reizschwelle entsprechende Doppelamplitude auf 1,3 cm, eine Sekunde später auf 1,1 cm (Mittel aus 11 Beobachtungen). Auf die wirkliche Länge der Drahtgabel (Mitte der Scheiben) reduziert, ergab dies eine Doppelamplitude von 1 cm, resp. 0,85 cm. Ich bestimmte nun durch Volummessung die Masse der Scheiben zusammen auf 87 g (der Gewichtsverlust in Wasser betrug 10,4 g, das Material, aus welchem

<sup>1</sup> V. SCHAİK: *Arch. Neerlandaises* 29, S. 87.

<sup>2</sup> K. L. SCHÄFER findet 16 als Grenzton, *diese Zeitschr.* 21, S. 172.

<sup>3</sup> EDELMANN: *Zeitschr. f. Ohrenheilkunde* 36, S. 335.

<sup>4</sup> C. G. MYERS: *Journal of Physiology* 28, S. 407.

<sup>5</sup> Vgl. C. STUMPF u. M. MEYER: *Ann. d. Physik u. Chemie* N. F. 61, S. 770.

sie gefertigt, war Gufsmessing, dessen spezifisches Gewicht auf 8,4 angegeben wird).

Die potentielle Energie einer schwingenden Bewegung wird von den physikalischen Lehrbüchern ( $m$  = Masse,  $a$  = Amplitude,  $T$  = Schwingungsdauer) zu

$$E = \pi^2 m \frac{a^2}{T^2}$$

angegeben. Führt man in diese Formel die obengenannten Größen ein, so findet man für die potentielle Energie der Gabel 85 782 Erg, eine Sekunde später 61 763 Erg. Der Verlust beträgt also 24 019 Erg.

**Oberer Grenzton.** Bei einer früheren Gelegenheit<sup>1</sup> fand ich die Töne des kleinen KÖNIGSchen Galtonpfeifchens bis zu folgenden Entfernungen hörbar:

$a^6$	bis auf	43	m
$b^6$	„	4,50	„
$c^7$	„	3,00	„
$cis^7$	„	0,50	„
$d^7$	„	0,10	„
$dis^7$	„	0,01	„

Zu jeder Seite einen Halbton extra-polierend darf man also annehmen, daß  $g^6$  ungefähr bis auf 10 000 mal weitere Entfernung als  $e^7$  hörbar war.

Die Beziehung zwischen Schallstärke und Entfernung ist wiederholt Gegenstand physikalischer Untersuchungen gewesen. Theoretisch nimmt der Schall natürlich ab wie die 2. Potenz der Entfernung. Jedoch empirisch hat man das Gesetz nur im freien Felde und für größere Distanzen bestätigt gefunden. Innerhalb der Räumlichkeiten eines Wohnhauses, im Garten, Promenaden usw. findet die Abnahme des Schalles gewiß nicht in dieser Weise, sondern wahrscheinlich wegen mannigfacher Reflexionen, ungefähr proportional der 1. Potenz der Entfernungen, statt. VIERORDT<sup>2</sup> hat hierfür einige Zahlenbeläge angeführt und die tägliche Erfahrung der Ohrenärzte stimmt mit dieser VIERORDT-schen Angabe überein. Wenn wir letztere vorläufig akzeptieren,

<sup>1</sup> ZWAARDEMAKER: *Zeitschr. f. Ohrenheilkunde* 24, S. 303; 1893.

<sup>2</sup> K. v. VIERORDT: Die Schall- und Tonstärke und das Schallleitungsvermögen der Körper. S. 235. 1885.



würde aus der Tatsache, daß in unserem Falle  $g^6$  des KÖNIGSchen Galtonpfeifchens 10 000 mal weiter hörbar war als  $e^7$  desselben Pfeifchens, zu folgern sein, daß damals  $g^7$  bei derselben physikalischen Intensität 10 000 mal lauter als  $e^7$  geklungen hat, 10 000 mal lauter, weil es in 10 000 mal größerer Entfernung wahrgenommen werden kann.

Die zum Hörbarmachen von  $g^6$  erforderliche, der strömenden Luft entnommene, Energie haben QUIX und ich<sup>1</sup> früher auf 49 000 Erg pro Sekunde berechnet. Die Bestimmungen geschahen damals nach einer von RAYLEIGH angegebenen Methode aus der bei günstigstem Lippenstand zum Anblasen der Pfeife verwendeten Luftmenge und aus dem Druck, unter welchem diese entströmte. Dabei wurde ersterer aus der mit Hilfe eines Anemometers aufgenommenen linearen Geschwindigkeit abgeleitet, was erlaubt schien, weil wir den gefundenen Zahlen vergleichenden Wert zu kennen wollten. Nun haben spätere Versuche mir ergeben, daß die lineare Stromgeschwindigkeit nicht in allen Punkten des Areal eines Anemometers die gleiche ist. Sie zeigt sich in den Randschichten bedeutend geringer als in den axialen Teilen des Stromes, so daß die am Zählwerk abgelesene Geschwindigkeit auch nach Anbringung der vorgeschriebenen Korrektur nicht ohne weiteres der mittleren Geschwindigkeit entspricht. Ja wahrscheinlich, wie Kontrollversuche mit einer sorgfältig geeichten Gasuhr lehrten, ist unter den Bedingungen des Experiments (trichterförmige Zuleitung) nur 46 % der abgelesenen linearen Geschwindigkeit als die wirkliche mittlere Geschwindigkeit, die zur Berechnung der dislozierten Luftmenge zu dienen hat, anzusehen. Wir wollen also die Energie unserer Schallquelle auf 22 600 feststellen. Bei diesen Versuchen befand sich der Beobachter auf 20 m von der tönenden Pfeife. Hätte er sich auf 5 cm Distanz befunden, so würde erstens wegen der wegfallenden für diese hohe Tonlage bedeutende Reibung der Luft diese Schallmenge um 5 % verringert werden können und zweitens würde nach VIERORDTS Distanzgesetz  $\frac{1}{400}$  genügt haben, also rund 54 Erg pro Sekunde. Da  $e^7$  nach Obenstehendem wenigstens 10 000 mal größere Energiemenge bedarf, beziffert sich die Energie, welche die Schallquelle des oberen Grenztons auch beim Belauschen aus unmittelbarer Nähe zum Hörbarwerden mindestens abgeben muß, auf 540 000 Erg.

<sup>1</sup> ZWAARDEMAKER u. QUIX: *Arch. f. Physiol.* 1902, Suppl. S. 367.



Wir brauchen nicht besonders hervorzuheben, daß die hier befolgte Rechnungsweise nur zu einer äußerst groben Abschätzung führt. Es ist sehr gut möglich, daß die wirklichen Werte mehrere Male größer oder kleiner sind. Namentlich die Schätzung der Energie der Schallquelle des oberen Grenztönen ist ungenau und die Einführung des Distanzgesetzes nach erster Potenz macht es wahrscheinlich, daß wir zu einem zu hohen Werte gelangt sind. Als eine erste Orientierung wollen wir das Resultat jedoch beibehalten.

**Mittelton.** Eine analoge Rechnung für eine *fis*<sup>4</sup> Pfeife, von RAYLEIGH<sup>1</sup> selber ausgeführt, lieferte bei Belauschung auf 820 m Distanz 1 847 000 Erg, also für die Nähe nach unserer Schätzung 0,0138 Erg.

**Zusammenfassung.** Für den unteren Grenztönen finden wir also rund 24 000 Erg, für den oberen Grenztönen 540 000 Erg und für einen Mittelton 0,0138 Erg. Diese Zahlen beanspruchen keine Genauigkeit, sondern bezwecken einfach, einen Einblick in die hier existierenden Verhältnisse zu geben. Dieselben beziehen sich auf eine Schallquelle, die aus unmittelbarer Nähe ohne irgend eine Resonanzvorrichtung noch gerade gehört werden kann und geben das Energiequantum an, welches von der betreffenden zweckmäßigen Schallquelle (Stimmgabel oder Orgelpfeife) pro Sekunde verbraucht wird, das Energiequantum also, welches man ihr pro Sekunde zuzuführen hat, um sie mit der gleichen Intensität einige Zeit tönend zu erhalten.

Der Leser wird sich fortwährend klar zu machen haben, daß in obenstehenden Fällen die Schätzungen für die Energie der Schallquellen im Momente, daß sie noch gerade aus unmittelbarer Nähe, sagen wir in 5 cm Entfernung, gehört werden, ausgeführt gedacht worden sind, daß wir jedoch keineswegs eine Kenntnis darüber gewonnen haben, wie groß die Energiemenge ist, die unter den angegebenen Versuchsbedingungen das Ohr erreicht. Es ist selbstredend, daß diese Menge kleiner sein muß. Bei Übertragungen von der Schallquelle einerseits auf die Luft andererseits findet ein nicht unbeträchtlicher Verlust statt, es sei denn, daß Energie zurückgeworfen oder in Wärme übergeführt wird.

Die wirkliche Energiemenge, welche unser Ohr reizt, wenn

---

<sup>1</sup> RAYLEIGH: *Proc. Roy. Soc.* 26, S. 248; 1877.

wir einen ganz leisen Schall hören, ist von mehreren Beobachtern längs verschiedenen Wegen berechnet worden. Wir haben die Ergebnisse dieser Untersuchungen in einer Tabelle zusammengefaßt und der bequemerem Vergleichbarkeit wegen die Schallenergie pro Sekunde und über 1 qcm verbreitet, angegeben.

Wie der Leser ersieht, stimmen die Angaben der fünf ersten horizontalen Reihen ziemlich gut unter sich überein. Die Unterschiede, welche sich dartun, fallen durchaus unter den Bereich der Beobachtungsfehler. Die beiden letzten horizontalen Reihen gehen aber, namentlich in den höheren Oktaven, erstaunlich auseinander. An anderer Stelle haben sowohl MAX WIEN<sup>1</sup> als mein Mitarbeiter QUIX und ich<sup>2</sup> uns über die Ursache dieser Differenzen verbreitet. WIEN glaubt sie unserer, nach seinem Urteil unrichtigen, Art des Berechnens zuschreiben zu müssen, wir unsererseits seiner, nach unserem Dafürhalten, unrichtigen Weise des Beobachtens. Wir wollen hier auf diese Controversia nicht zurückkommen und nur kurz hervorheben, daß unsere Berechnungen sich auf eine empirisch gefundene Proportionalität der Schallenergie in der Luft mit der 1, 2. Potenz des Gabelausschlages stützte (STEFANINI hatte früher Proportionalität mit der 1. Potenz gefunden, während WIEN Proportionalität mit der 2. Potenz behauptet) und daß die Resultate WIENS deswegen so außerordentlich klein ausfallen, weil, wie wir glauben, noch ein mitgehörter aber nicht mitgerechneter, durch Knochenleitung zugeleiteter bzw. vom Telephongehäuse herrührender, Anteil hinzugenommen werden muß.

Wenn man unsere Berechnungsweise nach der 1, 2. Potenz des Gabelausschlags nicht auf alle Stimmgabeln ausdehnt, sondern auf diejenigen Amplitudines und Distanzen, für welche sie empirisch festgestellt ist, beschränkt, so lassen sich unter gewissen Voraussetzungen aus unseren Beobachtungen von den früher mitgeteilten etwas abweichende Resultate ableiten, welche den WIENSchen einigermaßen näher stehen, sei es auch, daß sie von denselben noch sehr weit entfernt bleiben. Für die eventuell anzugebende Begründung einer solchen Umarbeitung des Versuchsmaterials sei auf unsere frühere Abhandlung hingewiesen. Wir betrachten unsere frühere und diese neuere Methode der

---

<sup>1</sup> M. WIEN: *Pflügers Arch.* **97**, S. 1.

<sup>2</sup> ZWAARDEMAKER u. QUIX: *Arch. f. Phys.* 1904.



Tabelle I.  
Schallenergie an der Hörgrenze pro Sekunde und pro Quadratcentimeter passierend in 10<sup>-8</sup> Erg.

	100	c	g resp. a	200	c <sup>1</sup>	g <sup>1</sup> resp. a <sup>1</sup>	400	c <sup>2</sup>	g <sup>2</sup>	800	c <sup>3</sup>	g <sup>3</sup>	1600	c <sup>4</sup>	g <sup>4</sup> resp. a <sup>4</sup>	3200	c <sup>5</sup>	g <sup>5</sup>	6400	c <sup>6</sup>	g <sup>6</sup>	12800
TÖPLER u. BOLTZ-			9900																			
MANN . . . . .																						
RAYLEIGH Pfeife																						
„ Stimmgabel					90	43		43							4500							
WIEN I (cont.) .			857			612																
WEAD . . . . .		7950			295	260		1100	1590		710											
ZWAARDEMAKER																						
u. QUIX . . . .		5894	9900		2707	469		1306	3727		5530	6618		3486	3652		6564	8214		11124	18336	
WIEN II . . . .	140			1,2			0,016			0,0008			0,00025			0,00025			0,0008			0,009

NB. Wir citieren WEAD nach seinen Errata in *Amer. Journ. of Science* 41, S. 235.

Berechnung für physikalisch gleichberechtigt. In beiden werden Generalisierungen gemacht, die nicht vollkommen zutreffen, jedoch als ein erster Schritt in einer neuen Richtung zugelassen werden können. Gänzlich verfehlt sind sie gewiß nicht, weil beide zu einem befriedigenden Resultate führen, insoweit als sie Werte ergeben, die mit jenen von anderen Autoren nach den verschiedensten Methoden gefunden, übereinstimmen. Namentlich durch die nach unserer ersteren Rechnungsweise in der oben abgedruckten Tabelle enthaltenen Zahlen werden die vereinzelt dastehenden, über die Skala verschiedentlich verteilten, Angaben der klassischen Physik zueinandergebracht.

Wir wollen also auch die wirklichen Schwellenwerte nebeneinander stellen und hiermit die von WIEN in 1903 erhaltenen Zahlen vergleichen. Im Gegensatz zur vorigen Tabelle ist das minimale Energiequantum jetzt in allen Tonhöhen zu der gleichen

Tabelle II.  
Schwellenwerte.

Tonhöhe	Schwingungszahl	ZWAARDEMAKER u. QUIX $\frac{a^{1.2}}{d^2}$	ZWAARDEMAKER u. QUIX $\frac{a^2}{d^3}$	WIEN 1903
<i>c</i>	128	30,7 · 10 <sup>−8</sup>	13 · 10 <sup>−8</sup>	
<i>g</i>	192	36,6	36,6 · 10 <sup>−8</sup>	3000 · 10 <sup>−14</sup>
<i>c</i> <sup>1</sup>	256	7,05	13,4 · 10 <sup>−9</sup>	
<i>g</i> <sup>1</sup>	384	10,6	13,8 · 10 <sup>−9</sup>	30 · 10 <sup>−14</sup>
<i>c</i> <sup>2</sup>	512	1,7	45 · 10 <sup>−11</sup>	
<i>g</i> <sup>2</sup>	768	3,2	71 · 10 <sup>−10</sup>	0,7 · 10 <sup>−14</sup>
<i>c</i> <sup>3</sup>	1 024	3,6	59 · 10 <sup>−11</sup>	
<i>g</i> <sup>3</sup>	1 536	2,9	47,4 · 10 <sup>−11</sup>	0,1 · 10 <sup>−14</sup>
<i>c</i> <sup>4</sup>	2 048	1,14	18,7 · 10 <sup>−11</sup>	
<i>g</i> <sup>4</sup>	3 072	0,79	13 · 10 <sup>−11</sup>	0,05 · 10 <sup>−14</sup>
<i>c</i> <sup>5</sup>	4 096	1,33	22 · 10 <sup>−11</sup>	
<i>g</i> <sup>5</sup>	6 144	2,45	39,6 · 10 <sup>−11</sup>	0,3 · 10 <sup>−14</sup>
<i>c</i> <sup>6</sup>	8 192	9	14,8 · 10 <sup>−11</sup>	
<i>g</i> <sup>6</sup>	12 228	9,94	16,3 · 10 <sup>−11</sup>	5 · 10 <sup>−14</sup>

NB. In dieser Tabelle ist für *c*<sup>2</sup> ein mit genauerem Dämpfungsfaktor als in der früheren Publikation berechneter Wert verzeichnet. Statt 0,7 · 10<sup>−8</sup> Erg. steht in Spalte 3 jetzt 1,7 · 10<sup>−8</sup> Erg.



Anzahl Perioden (von  $c$  bis  $c^5$  zwei Schwingungen, von  $c^5$  bis  $g^6$  zu 20 ansteigend) und zum Areal des Gehörgangs zurückgebracht. In dieser Weise vorgehend, enthält die Tabelle diejenigen Werthe, welche nach unserer resp. WIENS Meinung als die wirkliche Schwelle des Gehörs zu betrachten sind.

Wie an anderer Stelle auseinandergesetzt und oben flüchtig angedeutet worden ist, halten wir Spalte 3 und 4 für physikalisch gleichberechtigt, Spalte 5 wegen nicht mitgerechneter Schallmenge für zu klein ausgefallen. Es hat gewiß seine Bedeutung, auch schon bei der gegenwärtigen Lage der Frage eine Wahl zu treffen, welche der Spalten, 3 oder 4, als richtig zu betrachten ist. Physikalische Überlegungen bringen uns vorläufig nicht weiter, denn Spalte 3 stützt sich auf von uns als wahrscheinlich angenommene quantitative Beziehungen bei der Energieübertragung, Spalte 4 auf eine von einigen und auch von WIEN bevorzugte Hypothese, wobei die Stimmgabel als polarisierte Schallquelle betrachtet wird. In Abwartung, daß weitere Untersuchungen diese rein physikalische Frage erledigt haben werden, ist die Physiologie berechtigt nachzusehen, welche der beiden in Spalte 3 und 4 verkörperten Anschauungen am besten zu ihren übrigen Fakta und Theorien paßt. Es scheint uns kein Zweifel darüber zu existieren, daß letzteres mit Spalte 3 der Fall ist und sowohl Spalte 4 als Spalte 5 bestimmt zu verwerfen sei.

Das Sprachgebiet der Tonskala wird von den verschiedenen Autoren nicht übereinstimmend angegeben, aber alle sind doch darüber einig, daß bei weitem die meisten Sprachlaute innerhalb der von unserer Tabelle umfaßten Breite liegen. Die Sprache findet also, nachdem sie vom Ohre analysiert worden ist, hierin gewiß ihren Platz. Nun haben für unser Ohr alle Laute der gewöhnlichen Sprache ungefähr dieselbe physiologische Intensität. O. WOLF hat zwar einige Differenzen in der Tragweite der verschiedenen Vokale und Konsonanten gefunden, aber sehr groß sind diese doch nicht. Die größte Differenz ist um das fünffache. In einer neueren Versuchsreihe hat mein Mitarbeiter QUIX für holländische Sprachlaute ähnliches gefunden. Die Flüsterlaute  $r$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $ng$ ,  $w$ ,  $oe$ ,  $o$  werden bis auf 10 à 12 m, daraus zusammengesetzte Flüsterworte bis auf 6 m verstanden. Die Flüsterlaute  $p$ ,  $t$ ,  $k$ ,  $i$ ,  $f$  tragen bis auf 20 à 25 und  $a$ ,  $e$ ,  $s$  bis auf 30 à 35 m. Die aus den beiden letzten Gruppen von

Vokalen und Konsonanten gebildeten einsilbigen Flüsterworte sind bis auf 20 à 25 m von einem normalen Ohr bequem analysierbar. Mehrsilbige Worte sind zu diesen Versuchen weniger geeignet, weil der Akzent Unregelmäßigkeiten schafft. Wenn man solche vermeidet, sind die Sprachlaute alle leidlich *aequi-intensiv*. Dieses Verhalten stimmt ausgezeichnet mit Spalte 3. Wenn nun aber die Werte der 4. Spalte richtig wären, würde man aus dem gleichmäßigen Charakter der menschlichen Sprache zu folgern haben, daß die Vokale niederer Tonhöhe *m*, *n*, *ng*, *w*, *u* mit tausendfach größerem Aufwande von Energie ausgesprochen werden als die Vokale mittlerer und höherer Tönhöhe. Wir haben keinen einzigen Grund, etwas derartiges anzunehmen. Die Sprachlaute entnehmen ihre Energie der Strömung der Expirationsluft. Zu einem Teil hat letztere beim Herausstreichen aus dem Munde ihre Geschwindigkeit beibehalten — die sogenannte wilde Luft der Sänger — zu einem anderen Teil hat sie auf dem Wege durch die Sprachorgane davon eingebüßt. Letzterer Anteil ist, soweit nicht in Reibung oder Wirbel aufgegangen, der Schallbildung zu gute gekommen. Gleichheit des Ausatemungsdruck vorausgesetzt, zeigt sich die Geschwindigkeit der aus dem Munde heraustretenden Luft bei *u*, dann bei *o* und *oa* größer als bei *a*, *e* und *i*. Wir dürfen also annehmen, daß die zur Schallbildung verwendete Energie des Luftstromes bei *u* keineswegs jene bei *a*, *e*, *i* übertraf. Auch das subjektive Gefühl der Anspannung der Muskulatur beim Sprechen ist der Annahme eines größeren Energieaufwandes bei Sprachlauten wie „*u*“ nicht günstig. Ebensowenig spricht die objektive Beobachtung der Muskelbewegungen dafür.<sup>1</sup> Alles in allem bleibt es vom sprach-physiologischen Standpunkte aus unwahrscheinlich, daß eine so große Unregelmäßigkeit des Einsatzes als die 4. oder 5. Spalte erfordern würde, existieren konnte, denn in diesem Falle müßte die Geschwindigkeit des Luftstromes oder die Ausnutzung desselben mitten im Worte tausend-, resp. millionenfach wechseln. Umgekehrt, wenn wir auf Grund sprachphysiologischer Erfahrungen die physikalische Energie der Sprachlaute nicht allzu verschieden annehmen müssen, wäre aus Spalte 4 und mit sogar monströser Übertreibung aus Spalte 5 zu folgern, daß das normale menschliche Ohr sich ungefähr in

---

<sup>1</sup> Vgl. z. B. L. P. H. EYKMAN: *Onderz. Physiol. Lab. Utrecht* (5) 4, S. 359.



einer Lage befindet, die vereinzelt für pathologische Zustände zutrifft, in welchen die Vokale und Konsonanten mit hohen Formanten unvergleichlich viel kräftiger klingen als jene mit niederen. Dieser Zustand ist in den mittleren Graden der Sklerosis aurium realisiert und führt zu sehr auffallenden, von den Kranken höchst peinlich empfundenen Abnormitäten im Hören,<sup>1</sup> welche das Erraten der Sprache ungemein erschweren. Sie ist normaliter, wie WOLF und QUIX lehren, gewiß nicht vorhanden und schließt, die Prämisse zugegeben, die Möglichkeit des Verhaltens nach Spalte 4 und 5 direkt aus.

Auch vom sinnesphysiologischen Standpunkte aus läßt sich die geringere Wahrscheinlichkeit der 4. und 5. Spalte der 3. gegenüber dartun. Die in denselben angegebenen Werte beziehen sich auf die Energiemengen, welche eine minimale Schallempfindung hervorrufen. Bekennen wir uns dabei zu der klassischen Resonanztheorie, so müssen wir annehmen, daß für alle diese Tonhöhen ein, sei es auch minimales, wahrnehmbares Mitschwingen der Transversalfasern bestimmter CORTISCHEN Membran zustande kommt. Es läßt sich nicht einsehen, warum die langen Fasern hierzu eine tausend- resp. millionenfach größere Energiemenge wie die kürzeren brauchen würden und letztere dann in vollkommener Ruhe bleiben. Die einzige noch weiter diskutierbare und einigermaßen ausgebildete Hörtheorie ist die Schallbildertheorie EWALDS.<sup>2</sup> Aber auch für diese gilt ähnliches. Weshalb wäre für die Entstehung von Schallbildern größerer Wellenlänge eine tausend-, resp. millionenfach größere Energiemenge nötig als für die Entstehung der Schallbilder kürzerer Wellenlänge. Wie WIEN<sup>3</sup> selber hervorhebt, hat man, wenn man die Richtigkeit seiner Werte annimmt, die HELMHOLTZsche Theorie aufzugeben. Ich füge hinzu, nicht nur die HELMHOLTZsche, sondern auch die EWALDSche Theorie hätte man zurückzuweisen und wieder in das Chaos der unzusammenhängenden Tatsachen zurückzutreten wie in vorhelmholtzscher Zeit.

Noch einen dritten Grund weshalb ich den Werten der dritten Spalte den Vorzug gebe, wollen wir der Klinik entnehmen. Zusammen mit F. H. QUIX habe ich 75 Fälle von Labyrinth-

---

<sup>1</sup> ZWAARDEMAKER: Ein Initialsymptom der Sklerose. *Zeitschr. f. Ohrenheilkunde* 28, S. 119.

<sup>2</sup> J. R. EWALD: *Pflügers Archiv* 76, S. 147; 1899.

<sup>3</sup> M. WIEN: *Pflügers Arch.* 97, S. 30.

leiden welche ich in den letzten 10 Jahren nach einem gemeinschaftlichen Plan persönlich untersuchen konnte nach der in der früheren Abhandlung beschriebenen Methode bearbeitet. Zuerst wurde die untere und die obere Grenze der Tonleiter festgestellt, dann für drei sorgfältig gewählte Tonhöhen  $C$ ,  $c^2$  und  $fis^4$  die Reizschwelle berechnet. Letzteres geschah, indem wir die vom Patienten angegebene Hörzeit mittels der konstanten, durch einen LUCAESchen Hammer gesicherten Anfangsamplitude mit dem Dämpfungsfaktor in Verbindung brachten und die Schwellenamplitude berechneten. Eine für allemal angelegte Tabelle setzte uns in Stand, die entsprechende relative Energiemenge zu finden. Weil wir aber für jedes untersuchte Organ eine Graphik anzulegen wünschten, verzeichneten wir nicht die Hörschwelle, sondern ihren reziproken Wert, die sogenannte Hörschärfe. Hierdurch erreichten wir, daß der graphisch herzustellende Wert jenseits des Grenztons Null und nicht unendlich groß wurde, wie es der Fall gewesen wäre, wenn wir statt der Hörschärfe den Energiewert der Schwelle hätten verzeichnen wollen. Manchmal zeigte sich in jenen pathologischen Fällen die Hörschärfe  $C$ ,  $c^2$  und  $fis^4$  so außerordentlich verschieden, daß nicht daran zu denken war, die Graphiken in gewöhnlicher Weise anzufertigen. Man würde doch keinen Überblick bekommen haben, weil die einen Ordinaten ungewöhnlich lang und die anderen verschwindend kurz gewesen wären. Unterschiede bis zum millionenfachen wurden oft für ein und dasselbe Organ gefunden. Wir stellten daher lieber in die angegebenen Punkte  $C$ ,  $c^2$  und  $fis^4$  je einen Kubus, dessen Inhalt die Hörschärfe vorzustellen hat. Dann genügt es, sich den Inhalt oder Schwere der Kuben zu denken, um in Verbindung mit den zu Null herabgehenden Endpunkten der Skala sich ein lebendiges Bild der Hörschärfen und ihrer Verteilung über die Tonleiter bilden zu können.

In den meisten der in dieser Weise untersuchten und von uns in Graphik gebrachten 75 Fällen von Labyrinthkrankheit fehlte, als die Skala in allen Fällen an einem Harmonium durchgenommen wurde, jeder Hiatus oder Delle. Man darf also die Gehörsschärfe als kontinuierlich, nicht sprungweise sich ändernd, betrachten. Wo wir auf etwas derartiges stießen, wurde es im Protokolle und in der Graphik sorgfältig verzeichnet. Dort wo diese Diskontinuitäten nicht gefunden wurden, d. h. in weitaus



der Mehrzahl der Fälle, ist es erlaubt aus den Hörschärfen für  $C$  und  $c^2$  bzw.  $c^2$  und  $fis^4$  die mittlere Gehörsschärfe des Tongehörs für den Skalenteil  $C$  und  $c^2$  bzw.  $c^2$  bis zu  $fis^4$  zu berechnen. Beide Mittelwerte zusammennehmend, natürlich darauf achtend, daß der erste auf 3 Oktaven, der zweite auf  $2\frac{1}{2}$  Oktave Bezug nimmt, kommt man zu einem generellen Mittelwerte für den ganzen Skalenteil von  $C$  bis  $fis^4$ .

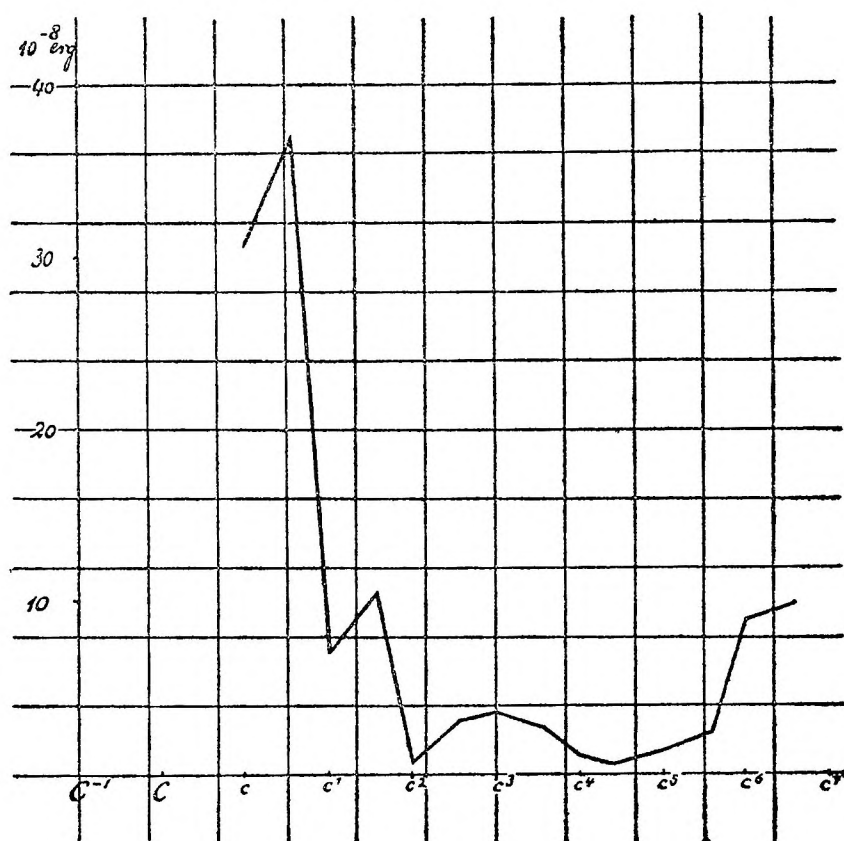
Der genannte Teil der menschlichen Tonleiter  $C$  bis  $fis^4$  umfaßt die große Mehrzahl der Formanten oder die dominierenden Töne der Sprachlaute. Nur das  $r$  und das  $s$  in seiner allerschärfsten Form fallen außerhalb dieses Gebietes. Es lohnt also der Mühe, das generelle Tongehör des Skalenteils  $C$  bis  $fis^4$  zu vergleichen mit dem Sprachgehör der Patienten. Letzteres wird bekanntlich nach der Methode von OSCAR WOLF, mittels Flüstersprache geprüft. Die normale Distanz bis zu welcher flüsternd gesprochene Worte im Mittel verstanden werden, ist nach O. WOLF 18 m. Recht viele Flüsterworte durcheinander prüfend trifft dieses auch nach QUIX für das Holländische zu. Nach dem Vorschlage von KNAPP gibt man die Hörschärfe eines Patienten in der Weise an, daß man die Distanz auf welcher die Flüstersprache noch faktisch gehört wurde im Zähler, die normale Distanz 18 m im Nenner stellt. Man nimmt also stillschweigend eine Proportionalität zwischen Sprachgehör und Distanz an und kann sich dabei auf Untersuchungen des Physiologen VIERORDT stützen, der wirklich innerhalb des gewöhnlichen Untersuchungsraumes eine Abnahme des Schalles proportional mit der Distanz fand, offenbar wegen Reflexionen an Boden, Dach und Wänden. Wenn wir nun in jedem konkreten Fall in dieser Weise generelles Tongehör für den Skalenteil  $C$  bis  $fis^4$  verglichen, zeigte sich zwar eine ziemlich große individuelle Verschiedenheit aber die Mittelzahlen ergaben eine sehr befriedigende Übereinstimmung. Unter Ausschluss der Fälle, in welchen das Gehör für Flüstersprache verloren gegangen war, konnte die Vergleichung für 106 Gehörorgane stattfinden. Das generelle Tongehör zeigte sich im Mittel 14,7 %, das Sprachgehör im Mittel 11,4 %. Von diesem Resultate überrascht, dehnten wir die gleiche Untersuchung auf 28 Fälle von Sclerosis aurium aus. Für die Kranken mit erhaltenem Gehör für Flüstersprache war das generelle Tongehör im Mittel 2,9 %, das Sprachgehör im Mittel 2,7 %. Dann zogen wir 45 Fälle von Trommel-

felldefekt und zikatriziellem Trommelfell herbei. Das generelle Tongehör ergab im Mittel 11,5 ‰, das Sprachgehör im Mittel 2,5 ‰. Endlich untersuchten wir 22 Fälle von seniler Sklerose und fanden, wo das Gehör für Flüstersprache erhalten geblieben, ein generelles Tongehör von im Mittel 11,6 ‰, ein Sprachgehör von im Mittel 2,6 ‰.

Alle diese Erkrankungsfälle sind, wir wiederholen es, in den letzten 10 Jahren nach demselben Plan mit denselben Stimmgabeln, denen mit LUCAESchem Hammer eine konstante Anfangsamplitude erteilt wurde, untersucht worden. Nachdem in 1901 und 1902 von QUIX und mir die Hörschwellebestimmungen für die gesonderten Töne der ganzen Tonleiter durchgeführt worden, wurde die zur klinischen Untersuchung verwendete Stimmgabel noch an anderer Stelle beschriebener Methode geeicht. Erst jetzt wurde das generelle Tongehör berechnet und mit dem Sprachgehör verglichen. Dann zeigte sich die wunderbare Übereinstimmung der Mittelwerte. Wie mir scheint, darf sie als eine Bestätigung der unserer Berechnung zugrunde liegenden Anschauungen angesehen werden, denn diese Übereinstimmung kann nicht zufällig sein. Sie zeigt sich für vier voneinander ganz getrennte Kategorien von Krankheitsfällen. Die Anschauungen, auf welche unsere Berechnung sich stützt, sind jene die auch Spalte 3 zugrunde liegen, nimmt es dann Wunder, daß wir an ihre Richtigkeit glauben? Wenn nicht nach  $\frac{a^1, 2}{d^2}$  sondern  $\frac{a^2}{d^3}$  wie WIEN behauptet, gerechnet werden soll, so kann von Übereinstimmung zwischen Tongehör und Sprachgehör nicht mehr die Rede sein. Dann sinken die Werte, welche die pathologische Hörschärfe vorzustellen haben, bis zu verschwindend kleinen Zahlen herab und das generelle Tongehör wird 1000fach kleiner als die nach dem Usus der Ohrenärzte berechneten Hörschärfe für die Sprache. Und sogar diejenigen, welche geneigt sein möchten, dem genannten ohrenärztlichen Usus nicht beizupflichten und für die Untersuchungslokale eine Schallabnahme wie im Freien zu postulieren, auch diese würden sich enttäuscht finden, denn auch dann bliebe das generelle Tongehör unendlich viel niedriger als das Sprachgehör der betreffenden Patienten. Die Erfahrung erhebt ihr Veto gegen jenes Ergebnis mathematischer Synthese, welches nicht in den reellen Beziehungen, sondern in theoretisch postulierten, wurzelt. In



der Sprache der Menschen klingen nur Töne und Geräusche, die aus gesonderten einfachen Schallschwingungen aufgebaut sind und keine anderen. Das generelle Tongehör muß also mit dem Sprachgehör übereinstimmen oder jedenfalls derselben Ordnung sein. In konkreten Fällen dürften vielleicht durch Beobachtungsfehler oder Ungeübtheit der Patienten Differenzen entstehen; bei der statistischen Bearbeitung größerer Beobachtungsreihen verschwinden diese Unregelmäßigkeiten und tritt das wahre Verhältnis rein hervor und dieses richtige Verhältnis kann nie anders als eine annähernde Gleichheit sein. Die Wahl ist für die Physiologie nicht schwer. Die dritte Spalte, die von uns in unserer ursprünglichen Abhandlung gegebenen Werte, sind die richtigen. Nur wenn die Physik später einmal unwiderlegbar bewies, daß die Schallenergie in der Luft wirklich proportional der zweiten Potenz des Gabelausschlags angenommen werden müßte und mithin die Stimmgabel wirklich als eine polarisierte Schallquelle zu betrachten sei, so würde sich die Sache ändern. Dann wären wir genötigt, uns damit zurecht zu finden und unsere Theorien hieran zu schmiegen. Aber bevor dies geschehen, sind wir berechtigt an den oben auseinander gesetzten Anschauungen fest zu halten. Wir wollen deshalb unsere jetzt mit mehreren Erfahrungstatsachen in Zusammenhang gebrachte Schwellenkurve des Gehörs hier noch einmal vorführen. Auf der Achse der Abszissen sind die Tonhöhen, auf der Achse der Ordinaten die dem Ohre zugehenden Energiewerte in 100 millionstel eines Ergs angegeben.



Wir haben uns nach obenstehenden Ausführungen die Schwellenwerte des Gehörs in dem der Sprache und der Musik gewidmetem Teile der Tonskala nicht allzu verschieden zu denken. Während einer kurzen, gerade zum Hören ausreichenden Zeit fließen dem Ohre beim Minimum perzeptibile ganz kleine Schallmengen zu die in 100millionstel eines Ergs bemessen werden. Der Ton für welchen das Ohr am empfindlichsten ist, ist  $fis^4$ , annähernd damit übereinstimmend  $c^2$ ; eine sehr ausreichende Empfindlichkeit wird zwischen  $c^1$  und  $g^5$  gefunden.

Wir kennen also die kleinste noch hörbare Schallwelle im Momente, daß dieselbe in den Gehörgang hineinkommt. Was ist nun ihr weiteres Schicksal?

Man denke allererst an die Übertragung des Schalles auf das Trommelfell. Dieselbe geschieht grösstenteils aus der Luft, denn es ist nicht anzunehmen, daß von der Margo tympanica aus ein nennenswertes Quantum Schallenergie in die Membran eindringt, oder falls es hineinkommt, wird es sich doch bald durch Interferenz anihilieren und keinesfalls in der Form einer Schallenergie wahrnehmbar sein.<sup>1</sup> Die hin und her pendelnde Luft des Gehörgangs und der Paukenhöhle aber, welche die leichten Membrana tympani einschließt, nimmt sie bei ihren Bewegungen mit und führt ihr Energie zu. An sich selbst überlassen, würde die Membran die ihr geschenkte kinetische Energie zu Eigenschwingungen verwerten. Durch die starke Dämpfung, welche die Kette der Gehörknöchelchen ausübt, wird sie hierin gehindert und sie klingt fast unmittelbar aus, d. h. trägt den grössten Teil des angenommenen Energiequantums an die dämpfende Kette ab. Aus den Berechnungen HELMHOLTZS im Jahre 1870 geht hervor, wie bedeutend die der Kette übertragene Energiemenge ist im Vergleich zur Amplitude der Schwingung der Knöchelchen. Die neuere Energetik erlaubt von diesem Geschehen eine sehr einfache Vorstellung zu geben. Sie sagt aus, daß, obgleich der Intensitätsfaktor bei der Übertragung erst von Luft auf Membran, dann von Membran auf die Knochen der Kette unzweifelhaft abnimmt, der Energieverlust nicht so besonders groß zu sein

---

<sup>1</sup> Bei kranio-tympaneller Leitung ist es wahrscheinlich, daß der Schall erst in die Luft des Gehörgangs und der Paukenhöhle übertritt und von dieser in das Trommelfell. MADER (*Wiener Sitzungsberichte* 109 (3), S. 73; 1900) hält auf Grund von Mikrophonversuchen den Weg via das Stapesringband für den wichtigeren.



braucht, weil im selben Augenblicke der Quantitätsfaktor zunimmt. Mechanisch betrachtet reguliert die besondere Form der Membran in sehr auffallender Weise die Abnahme der Amplitude der Schwingungen. Zwar wäre, wenn diese besondere Form nicht vorhanden gewesen, der Intensitätsfaktor nicht weniger gewiß bedeutend abgefallen. Denn man bedenke, daß das Produkt der beiden Faktoren sich unmöglich vergrößern kann und also eine Zunahme des Quantitätsfaktors notwendig eine Abnahme des Intensitätsfaktors einschließt. Aber durch die eingezogene Form ist das Trommelfell diesen Verhältnissen angepaßt und die Verringerung der Amplitude findet in vorgeschriebener, geordneter, und nicht in sich zufällig ergebender Weise statt. Man kann sich vorstellen, daß infolgedessen die Energieübertragung regelmäßiger stattfindet und weniger Energie in ungeordnete Form d. h. in Wärme übergeht.

Wegen der starken Dämpfung des Trommelfells ist es überaus unwahrscheinlich, daß es einen größeren Teil der ihm aufgedrungenen Energie wieder der Luft übertragen könne. Im Gegenteil, die ganze Einrichtung läßt erwarten, daß der übergroße Anteil der dämpfenden Knochenkette zugeleitet werden muß. Von außen hineinkommende Schallwellen werden daher ihre kinetische Energie dem Trommelfelle, und von diesem aus der Kette der Gehörknöchelchen übertragen. Was sich in der Paukenhöhle fortsetzt, ist nur ein Rest der von der Luft getragenen Schallwelle. Sie verfolgt den ursprünglichen Weg, nachdem der größte Teil der Energie der ihr quer in der Bahn liegenden Membran abgegeben ist.

Es wäre interessant zu wissen, welcher Teil der ursprünglichen Energie dem Trommelfell und der tympanalen Kette, welcher der hinter der Membran gelegenen Luft zukommt. Leider ist das Verhältnis beider Teile gänzlich unbekannt. Weil der letztere der beiden Teile später jedoch über das ganze Promontorium sich zu verbreiten hat und in weiteren Bahnen durch Interferenzen bedeutend abgeschwächt wird, erscheint sie uns in der Norm akustisch als ein Verlust.

Den anatomischen Anordnungen entspringen noch weitere Vorteile. Unter diesen ist die Tatsache, daß die Schallenergie statt im Felsenbein zerstreut zu werden, wie geschieht, wenn das Trommelfell fehlt, in einem kleinen Rayon, in jenem des



ovalen Fensters konzentriert wird<sup>1</sup>, gewiß nicht gering zu veranschlagen. Wir wollen nun einige Eigentümlichkeiten der hier stattfindenden Energieübertragung auf die Spur zu kommen versuchen.

Die Fortpflanzung des Schalles innerhalb der Labyrinthflüssigkeit des Ohres ist in den letzten Jahren Gegenstand vielfacher Kontroversen gewesen. Während die eine Gruppe sogenannte Massenbewegung der ganzen Perilymphekolonne annimmt, wollen andere nur Molekularschwingungen zulassen. Wie mir scheint, beruht die Divergenz der Meinungen auf den verschiedenen Definitionen, die von dem Begriff Massenbewegung und Molekularschwingung gegeben werden. In HELMHOLTZS berühmter Abhandlung über die Mechanik des Trommelfells u. s. w. wird darunter nur ein scheinbar gleichzeitiges Hin- und Herpendeln der Teile eines Körpers verstanden, so daß es den Anschein hat, als ob der Körper als eine Masse hin- und herschwingt und die verschiedenen Moleküle gegenseitig scheinbar in derselben Lage bleiben. Das Phänomen tritt nur dann auf, wenn die Wellenlänge sehr groß ist im Vergleich zu den Abmessungen des schwingenden Körpers (trifft für das Trommelfell und Gehörknöchelchen zu). Also dann ist gar kein Unterschied zwischen diesen Massenschwingungen und den Molekularschwingungen vorhanden, erstere sind nur Komplexe einiger gleichzeitiger, dem Orte nach nebeneinander stattfindenden, Molekularschwingungen.

Es gibt jedoch noch eine andere Art von Massenschwingungen, die gar kein Schall sind, nur gleichzeitig mit ihm entstehen, ich meine die Wirbel, die sich in der Luft oder in der Flüssigkeit überall bilden, wo eine Schallquelle ihre Schwingungen ausführt. Um eine elektrisch getriebene Stimmgabel herum, welcher man einen etwas größeren Ausschlag erteilt, kann man sie förmlich fühlen und ihre Richtung und Verteilung mit einem kleinen Anemometer von DAVIS demonstrieren.<sup>2</sup> DVORÁK hat zu ihrem

---

<sup>1</sup> Vgl. die Begründung von MADER l. c. S. 37f.

<sup>2</sup> Wenn man sich auf energetische Betrachtungen stützt und sich überlegt, daß die Luft ungefähr eine 6260mal geringere Dichte besitzt als der Stahl, aus welchem eine Stimmgabel verfertigt ist, so folgt aus der von uns für die Übertragung berechneten Herabsetzung der Schwingungsenergie bis auf  $\frac{1}{27}$  (WEAD nahm  $\frac{1}{17}$  an), daß die von der Gabel in fühl-

Studium besondere Apparate hergestellt und HENSEN hat einige bemerkenswerte Beobachtungen über sie veröffentlicht.<sup>1</sup>

Man kann sich die Wirbel nun als eine Folge der Inertie des Mediums oder mit LARROQUE<sup>2</sup> als die Folge der Pseudoviskosität der vibrierenden Luft denken, jedenfalls zeigen sie sich faktisch überall dort wo Schallschwingungen von einigermaßen ausgiebiger Amplitude, es sei in der Luft oder in einer Flüssigkeit, vorhanden sind. Sie unterscheiden sich von den wirklichen Schallschwingungen dadurch, daß es sich nicht um ein Hin- und Herpendeln, sondern um wirkliche Verschiebung handelt. Letztere hat eine ganz bestimmte Stromrichtung und einen festen Mittelpunkt.

Selbstverständlich wird man diese Wirbelung nur wahrnehmen können, wenn die Amplitude der Schallquelle recht bedeutend ist. Bei ganz kleinen Amplitudines werden die Wirbel wahrscheinlich verschwindend gering sein, obgleich der hervorgerufene Schall noch bedeutende Intensität haben kann. Nun, auch in der Perilymphe werden die Wirbel nicht fehlen, wenn die schwingende Stapesplatte ihre Schallwellen in die Flüssigkeit hineintreibt, aber wahrscheinlich sind sie unendlich klein. Nach unserem Dafürhalten kommen sie beim Hören gar nicht in Betracht, wenigstens nicht beim Hören der Säugetiere und der Vögel. Es bleibt immerhin möglich, daß bei niederen Vertebraten gerade diese Flüssigkeitswirbel eine Rolle spielen und weil sie sich gewiß wohl in die statischen Teile des

---

baren Schwingungen gehaltene Luftmasse ungefähr 232mal größer sein muß als die Gabelmasse selber. Die linearen Abmessungen dieser hin- und herpendelnden Luftmassen würden nach diesen Anschauungen 6mal größer sein als die linearen Abmessungen der Gabel. Ihre Amplitude sei dabei jener der Gabel genau gleich (was jedenfalls nur ein Extrem ist, denn die Amplitude der Luft kann nie größer, sehr wohl kleiner sein). Wenn die Luft in der Umgebung einer anhaltend elektrisch getriebenen Stimmgabel mittlerer Tonhöhe wie oben angegeben mit dem Finger untersucht wird, fühlt man in diesem ganzen Bezirk deutlich die kalte Wirbelung und kann man dieselbe mit dem DAVISSchen Apparat auch objektiv dartun. Eine sehr ausgedehnte, die Gabel ringsum umgebende Luftmasse ist hier also in fortwährender Bewegung. Eigentlich enthält dies nichts Wunderbares, denn man fühlt den Fächer auch in einer größeren Distanz, als die Ausschläge würden erwarten lassen.

<sup>1</sup> V. HENSEN: U. d. akust. Bewegung in dem Labyrinthwasser. *Münchener Med. Wochenschr.* (14); 1899.

<sup>2</sup> LARROQUE (*C. R.* 132 S. 1182) deutet die Wirbel als eine Folge der Quasi-Viskosität der vibrierenden Luft.



Labyrinths hinein fortpflanzen, den Schein eines Hörens hervorrufen können.<sup>1</sup>

Die wirklichen Schallwellen, die von der schwingenden Luftplatte in der Labyrinthflüssigkeit hervorgerufen werden, bewegen sich nach akustischen Gesetzen, von der harten Knochenwand der Labyrinthkapsel reflektiert, in bestimmten Schallstrahlen durch die Labyrinthflüssigkeit. Der Verlauf dieser Schallstrahlen ist von GAD<sup>2</sup> gezeichnet worden und ich kann mir kaum anderes denken als daß es sich dabei um Molekularschwingungen handelt. Diese Molekularschwingungen werden von den zarten Bändern des membranösen Labyrinths nicht reflektiert, sondern sie durchsetzen sie wahrscheinlich ohne nennenswerten Energieverlust. Peri- und Endolymphe werden als eine Flüssigkeit zu betrachten sein, deren Bewegungen der zart ausgespannenen Membrana basilaris ohne Mühe folgt. Es wiederholt sich das vom teleologischen Standpunkte so bewundernswerte Verhalten, welches wir im Mittelohr kennen gelernt haben. Dort im Mittelohr flottierte das ausgespannte Trommelfell in der den Gehörgang und die Paukenhöhle ausfüllenden Luft, hier flottiert die Membrana basilaris in der die Skalae und den Duktus ausfüllenden Flüssigkeit. Dort wie hier Molekularschwingungen, welche die Membran in ihrem Hin- und Herpendeln mitnehmen. Der HELMHOLTZschen Definition gemäß, führt die Membran Massenschwingungen aus, weil ihre Dicke unendlich klein ist der Wellenlänge des sie mitführenden Schalles gegenüber. Dort wie hier eine Energieübertragung die zu Eigenschwingungen führen würde, wenn keine starke Dämpfung vorhanden wäre, dort von Gehörknöchelchen, hier von dem CORTISchen Organ herrührend. Diesem dämpfenden Apparate überträgt die schwingende Membran den größten Teil ihrer Energie. Er ist also der weiterleitende Weg.

In diesem Gedankengang ist es klar, daß wir uns die von der Membrana basilaris analysierte, nach ihrer Periode geordnete, Schallmenge dem CORTISchen Organ und dem sie belastenden Teil übertragen zu denken haben (siehe das zu vollkommen demselben Resultate führende, nicht energetische, sondern rein mechanische Raisonement TER KUILES<sup>3</sup>). Hier zuletzt befindet

<sup>1</sup> Vgl. hierüber H. DEETJEN: Akustische Strömungen der Perilymphe. *Zeitschr. f. Biol.* **39**, S. 159.

<sup>2</sup> SCHWARTZES Hdb. d. Ohrenheilk. I.

<sup>3</sup> E. TER KUILE: *Pflügers Arch.* **79**, S. 146; 1900.



sich das Endorgan, die Haarzellen, welche durch die sie berührende Bewegung in Erregung gesetzt werden und ihre Erregung den sich an sie anschmiegenden Nerven übertragen. Hier tritt auch die Verwandtschaft mit dem Tastsinn hervor, wo namentlich für die Tasthaare derselbe Mechanismus vorgebildet ist.

Wenn wir in dieser Weise die winzig kleine Schallmenge, welche als Minimum perzeptibile in den Gehörgang eingedrungen ist, auf ihrem Weg verfolgen, so finden wir rekapitulierend drei Energieübertragungen, ehe sie das Tasthaar erreicht.

1. Die Energieübertragung von Luft auf Trommelfell und tympanale Kette;
2. von der Stapesplatte auf die Labyrinthflüssigkeit;
3. von der Labyrinthflüssigkeit auf die Membrana basilaris und die auf ihr ruhenden dämpfenden Apparate.

Die erste Energieübertragung geschieht nach geordnetem, von der Organisation genau vorgeschriebenem Weg, sie findet mit nicht sehr großem Energieverluste statt. Die zweite Energieübertragung findet statt von einem festen knochenharten Körper auf eine wässrige Flüssigkeit. Besonders günstig ist dieses Verhalten nicht, es gleicht der Energieübertragung von einer Stimmgabel oder Telephonplatte auf mit ihr in Berührung seiendem Wasser. Sie wurde früher von DENNERT<sup>1</sup>, neuerdings von KAYSER<sup>2</sup> studiert. Die dritte Energieübertragung geschieht von einer Flüssigkeit auf eine zarte Membran, sie ist wahrscheinlich die günstigste von allen. Ein derartiges Verhalten wurde vor kurzem von HENSEN und KLEIN mit ihrer Wasserzunge geprüft.

Allem in allem wird unsere ins Ohr hineingetretene Schallmenge sich noch bedeutend verringert haben, wenn sie zum Tasthaar herankommt.

Früher hat WEAD die von einer Stimmgabel an die Luft übertragene Energiemenge auf  $\frac{1}{15}$  des ursprünglichen Betrages berechnet, wir nach anderer Methode auf  $\frac{1}{27}$ . Nehmen wir an, daß bei den anderen Energieübertragungen ähnliche Werte in Betracht kommen, so würde der Gesamtverlust der drei oben beschriebenen Übertragungen die Schallenergie so ungefähr auf  $\frac{1}{10000}$  herabsetzen. Diese Energiemenge war von der Ordnung  $10^{-8}$  Erg. An die Haarzellen herankommend, würde sie also

<sup>1</sup> DENNERT: *Arch. f. Ohrenheilk.* 45, S. 20; 1898.

<sup>2</sup> KAYSER: *Zeitschr. f. Ohrenheilk.* 37, S. 217; 1900.

von der Ordnung  $10^{-12}$  herabgesunken sein. Es ist aber sehr wohl möglich, daß die in der Organisation vorgebildeten Energieübertragungen sich außerordentlich viel günstiger gestalten als die in unseren Laboratorien artifiziell hervorgerufenen. Ganz ohne Verlust werden die natürlichen Organe aber gewiß nicht arbeiten und können wir es also für sicher halten, daß die den Haarzellen mitgeteilte Energiemenge, wenn die Schwelle der Erregung überschritten werden soll, zwischen  $10^{-8}$  und  $10^{-12}$  Erg zu betragen hat.

Die von fast allen Autoren supponierte, hier weiter ausgeführte, Analogie mit einem Tastorgan macht es erwünscht die akustischen Schwellenwerte, die wir jetzt kennen gelernt haben, mit den taktilen zu vergleichen. Nach VON FREY und KIESOW mißt die Projektion eines Tastkörperchens auf die Haut 0,0015 qmm und ist das Minimum perzeptibile eines solchen kleinen Organs auf  $1\frac{1}{2}$  mm Hg zu stellen. Der auf das Tastkörperchen im Momente der Schwellenempfindung ausgeübte Druck berechnet sich auf 0,03 mg. Die kleinste Verschiebung welcher ein die Haut berührender Körper unterworfen sein muß, damit er fühlbar werde, beträgt nach der RUMPF-SERGISCHEN Methode 0,103 mm. Ich fühle eine mit Tuch umkleidete C-Gabel bei noch geringerem Ausschlag, nach einer Schätzung 0,030 mm. Legen wir letzteren Wert als den kleinsten unserer Berechnung zugrunde, so wäre, wenn es erlaubt ist beide Minima zu kombinieren, die bei der Ausübung eines wahrnehmbaren Drucks herzugebende Arbeit auf  $0,03 \text{ mg} \times 30 \mu = 1 \mu \text{ mg} = 10^{-4} \text{ Erg}$  zu veranschlagen.

ZIEHEN<sup>1</sup> kommt für Stoßreize mit seinem Pendelästhesiometer zu  $30 \text{ mg mm} = 3 \text{ Erg}$ , will diesen Wert jedoch nur als einen vorläufigen betrachtet wissen. v. FREY kommt zu einem mit dem meinigen übereinstimmenden Wert;  $6 \cdot 10^{-2} \text{ Erg pro } m \text{ m}^2$  oder  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Erg pro Tastkörperchen}$ . Für immerfort sich wiederholende Druckreize ist der Schwellenwert also vielleicht von der Ordnung  $10^{-4} \text{ Erg}$ , für Stoßreize von derselben GröÙe oder von der Ordnung eines Ergs. Lassen wir im allgemeinen beide Zahlen wieder als Extreme zu, so lieÙe sich die taktile Schwelle auf  $10^{-4}$  bis 1 Erg veranschlagen.

Die beiden nebeneinander zu stellenden Schwellenwerte der Taktilen von der Ordnung  $10^{-4}$  bis 1 Erg und der inneren Akustischen von der Ordnung  $10^{-12}$  bis  $10^{-8}$  Erg gehen ziemlich

<sup>1</sup> Leitfaden der phys. Psych. 6. Aufl., S. 61.



weit auseinander, aber wenn man sich überlegt, daß der erste gröfsere Wert sich auf ein oberflächlich gelegenes an vielseitige Funktionen anzupassendes Sinnesorgan bezieht und letzterer kleinere Wert für ein in tief geschützter Lage sehr speziell differenziertes gilt, kann dieser Unterschied an und für sich uns nicht so besonders wundern.

Über die bei der Reizung im Inneren des Tastkörperchens sich abspielenden Vorgänge ist meines Wissens nur einmal in der Literatur eine Hypothese aufgestellt worden. Es ist jene von FREYS<sup>1</sup>, nach welcher der hydrostatische Druck zu einer minimalen Erhöhung des osmotischen Drucks in der mit dem Tasthaar in Berührung stehenden Zellen führt und dieser erhöhte osmotische Druck für sich wieder einen Reiz für den anliegenden Nerven sein soll. Es ist unmöglich irgend eine Vermutung zu hegen über die Zeit, in welcher ein solcher Vorgang abspielt; nur läßt sich sagen, daß sie ungemein kurz sein muß und dasselbe läßt sich behaupten für den Vorgang in den Haarzellen des Gehörorgans, denn die Reaktionszeit ist hier kürzer als für irgend ein anderes Sinnesorgan. Man kann sich nun fragen, was wirkt als Reiz: der im Moment des Maximumauschlags erreichte Druckwert oder die kontinuierliche Wirkung des allmählich zunehmenden, später in der zweiten Hälfte der Periode wieder abnehmenden Drucks? F. H. QUIX<sup>2</sup> hat diese Frage vor kurzem diskutiert, ohne jedoch zu einem Abschluß zu kommen. Im Lichte der v. FREYSchen Hypothese wäre eine integrale Wirkung anzunehmen, welche vielleicht im Nerven zu einer summierten Erregung führt. Es existiert von diesem Gesichtspunkte auch gar kein Widerspruch zwischen den erstaunlich hohen Schwingungszahlen, welche noch hörbar sind, und der verhältnismäfsig viel niedrigeren, zur Nervenirregung noch zulässigen Unterbrechungszahl eines elektrischen Stromes. Im ersten Falle ist der Reiz gar nicht intermittierend; er schwillt nur an und ab, seine Wirkung innerhalb der von der Eigenart des Nerven gestellten Grenzen summierend.

---

<sup>1</sup> M. v. FREY: Unters. üb. d. Sinnesfunktionen d. menschl. Haut. *Abh. d. k. sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Kl.*, 23, S. 259.

<sup>2</sup> F. H. QUIX: *Zeitschr. f. Ohrenheilk.* 45, S. 5.

(Eingegangen am 20. September 1903.)

---