Zur Theorie des Hörens bei der Schallaufnahme durch Knochenleitung

Von Georg v. Békésy

(Mitteilung aus dem k. ung. Telegraphentechnischen Versuchsamt Budapest)

(Mit 20 Figuren)

I. Einleitung

Ein schwingender Körper kann auf zwei verschiedene Arten hörbar werden. Einmal, indem seine Bewegungen sich der Luft mitteilen und das so entstehende Schallfeld das Trommelfell in Schwingungen versetzt, zweitens, indem der schwingende Körper unmittelbar mit den Schädelknochen in Berührung kommt. Im folgenden soll nun der Zusammenhang und der Unterschied zwischen dem Hören bei Luftleitung und Knochenleitung dargestellt werden.

Berührt man z. B. mit dem Stiel einer schwingenden Stimmgabel den Kopf, so ist die Wellenlänge der in den Schädelknochen entstehenden Druckwellen, im Gebiet der hörbaren Frequenzen, jedenfalls gegenüber den Abmessungen der einzelnen Nervenzellen so groß, daß zwischen den benachbarten Nervenzellen keine merklichen Druckdifferenzen auftreten können. Damit bleiben auch die Konzentrationsänderungen an der Zellwand aus, so daß es gemäß der Theorie der Nervenerregung[1]) zu keiner Erregung kommen kann. Da somit die direkte Erregung der Hörnerven durch die Kompressionswellen unwahrscheinlich wird, so ist das ganze Problem rein physikalisch, indem zu ermitteln ist, auf welche Weise die Kompressionswellen eine Verschiebung der Basilarmembran gegenüber ihrer normalen Lage in der Schnecke bewirken. Denn nur durch eine lokale Deformation der Basilarmembran kann ein Druckgefälle zwischen benachbarten Zellen entstehen.

Um dies zu beweisen, versuchen wir die durch Knochenleitung entstehende Tonempfindung durch einen Luftleitungston gleicher Frequenz zum Verschwinden zu bringen. Würde die allgemeine Druckänderung in der Schnecke eine Reizung der Hörnerven bewirken, so ist diese jedenfalls längs der ganzen

1) Phys. Ztschr. **30.** S. 740. 1929.

Basilarmembran gleichphasig. Beim Luftleitungston dagegen entstehen zum Teil längs der Basilarmembran fortschreitende Wellen, so daß sich die Phasenverhältnisse längs der Basilarmembran dauernd ändern. Gelingt es daher, einen Knochenleitungston durch einen Luftleitungston derart zu kompensieren, daß überhaupt nichts mehr gehört wird, so können wir sicher sein, daß beim Knochenleitungston sich die Basilarmembran genau so bewegt, wie beim Luftleitungston, d. h. in beiden Fällen hauptsächlich durch die Bewegungen der Steigbügelplatte die Schwingungen der Basilarmembran entstehen und sich außerdem eine andere Art der Erregung der Hörnerven nicht vorfindet.

Da für das Gelingen der Kompensation große Konstanz der Amplituden- und Phasenverhältnisse Voraussetzung ist, so wurde der Knochenleitungston durch einen Schwingungskörper erzeugt[1]), der von einem Röhrengenerator angetrieben wird und an einem leicht drehbaren Arm, Fig. 1, so befestigt ist, daß vermittelst einem über eine Rolle laufenden Gewicht der Schwingungskörper unabhängig von der Stellung des Kopfes mit konstantem Druck auf die Mitte der Stirn gedrückt wird. Der gleiche Generator speiste über je eine Eichleitung und einen Phasendreher zwei Fernhörer, die an die beiden Ohren mittels eines besonderen Kopfbügels angelegt wurden. Es ist nämlich zweckmäßig, die Fernhörer nicht unmittelbar an die Ohren zu drücken, sondern sie mit einem Drahtring von etwa 8 cm Durchmesser zu versehen, der etwa 2 cm von der Fernhörermuschel absteht und nicht auf die Ohrmuscheln, sondern auf den Schädelknochen aufliegt, wodurch eine größere Konstanz der Tongebung erhalten wird. Es gelang nun bei 400 Hz und einer Lautstärke des Knochenleitungstones, die das 500fache der Hörschwelle betrug, bei genügender Oberwellenfreiheit der Stromquelle, durch geeignete und schrittweise Einstellung der Eichleitungen und Phasendreher den Knochenleitungston vollkommen zum Verschwinden zu bringen.

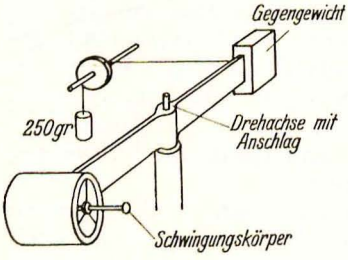

Fig. 1. Befestigungsart des Schwingungskörpers zur Erzielung eines konstanten Druckes der Auflagefläche

1) Schwarz u. R. Bárány, Ztschr. für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde **27**. S. 434. 1930.

Die Beobachtung ist deshalb schwer, weil man in beiden Ohren gleichzeitig kompensieren muß und die geringste Bewegung des Kopfes oder Unterkiefers die Einstellung ändert. Bei einigen Beobachtern verändert außerdem der Blutdruck im Takte des Herzschlages die Einstellung, so daß die Kompensation nur für einzelne Phasen des Herzschlages durchführbar wird. Bei Frequenzen über 800 Hz gelangt man in das Resonanzgebiet der Gehörknöchelchen, wodurch die Einstellung der Phase sehr erschwert wird. Für Frequenzen unterhalb 100 Hz ist meist außer dem Knochenleitungston auch noch deutlich eine Tastempfindung an der Berührungsstelle des Schwingungskörpers zu fühlen. Sind beide Empfindungen etwa gleich stark, so kann man sie gut trennen und beide gesondert gleichzeitig wahrnehmen. Vermindert man jedoch den Knochenleitungston, so schmelzen beide Empfindungen bald zusammen, so daß eine weitere Verminderung des Knochenleitungstones nicht mehr festgestellt werden kann. Die relative Stärke der Tastempfindung zur Hörempfindung ist nicht an allen Stellen des Kopfes gleich und ändert sich auch mit der Form des Druckkörpers.

II. Die Schwingungsform der Schädelknochen

Wegen der verhältnismäßig großen Elastizität und Härte der Knochen bilden sich an der Schädelkapsel stehende Schwingungen aus, wenn sie an irgendeiner Stelle in Schwingungen versetzt wird. Bereits mit einem Gummischlauch lassen sich die Wellenknoten und -bäuche gut abhören. Mit einem Schallplattentonabnehmer läßt sich zeigen, daß an den Stellen, wo mit dem Schlauch nichts hörbar ist, die Knochenoberfläche keine Querschwingungen, sondern Längsschwingungen ausführt. Um für einen Dauerton die Schwingungsamplitude der Knochenwand an einer gewissen Stelle zu messen, verwendet man zweckmäßig die früher beschriebene Anordnung[1]), bei der die Schwingungsamplitude eines Tastkörpers so lange verändert wird, bis bei Berührung der ebenfalls mit der gleichen Frequenz schwingenden Knochenwand sich die Schwingungsamplitude des geeichten Tastkörpers nicht ändert. Dies tritt nur dann ein, wenn die Knochenwand und der Tastkörper der Phase und Amplitude nach vollkommen gleich schwingen, denn nur in diesem Falle beeinflußt der eine Körper bei der Berührung den Schwingungszustand des anderen nicht. Da an vielen Stellen die Haut ziemlich lose aufliegt, so schwingt sie oft mit kleinerer Amplitude als der darunterliegende Knochen. Bei der losen Berührung mit dem Tastkörper erhält man dann die Schwingungsamplitude an der Hautoberfläche. Drückt man jedoch den Tastkörper mit größerem Druck gegen den Knochen, so wird die Haut zusammengepreßt und schwingt mit dem Knochen gleichartig, so daß nun der Tastkörper die größere Schwingungsamplitude des Knochens annehmen muß, damit

1) Ann. d. Phys. [5] **11.** S. 227. 1931.

beim Abheben sich sein Schwingungszustand nicht ändert. Entspricht die Schwingungsamplitude des Tastkörpers derjenigen des Knochens, so bewirkt eine weitere Vergrößerung des Druckes keine Änderung der Einstellung. Bei einem Druck von 250 g und einer Auflagefläche von 0,5 cm² konnte bereits eine 0,5 cm dicke Schicht von Gummischwamm dazwischengelegt werden, ohne daß sich die Meßwerte änderten.

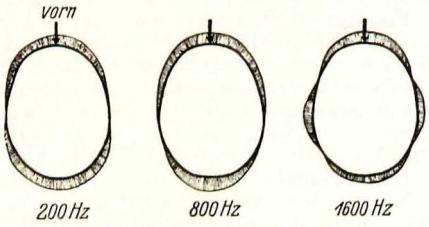

Fig. 2. Schwingungsamplitude längs der Schädelbasis, Schwingungskörper am Stirnbein

In den Figg. 2 und 3 ist die Größe der Amplitude der Querschwingungen für die verschiedenen Stellen des Kopfes eingetragen. Der Pfeil gibt den Ort des Schwingungskörpers an. Die Fig. 4 zeigt, daß sich die vier Knoten noch ziemlich gleichmäßig mit der Ansatzstelle des Schwingungskörpers verschieben. Dies deutet an, daß trotz der sehr wechselnden Stärke der Schädelwand die Schwingungen sich dennoch bei tiefen Frequenzen von denen der Kugelschale mit gleichförmiger Wandstärke nicht wesentlich unterscheiden. Bei Frequenzen mit sechs Schwingungsknoten trifft dies nicht zu, da hier bei einer Verschiebung des Schwingungskörpers die Knoten meist sprungweise ihre Lage ändern.

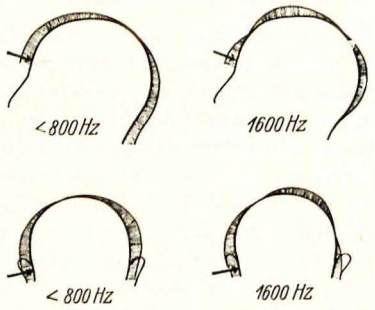

Fig. 3. Schwingungsamplituden in den beiden vertikalen Ebenen bei Übertragung der Schwingungen auf das Stirnbein und den Warzenfortsatz

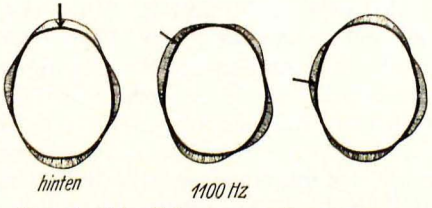

Fig. 4. Die Schwingungsknoten verschieben sich näherungsweise gleichförmig mit dem Ort des Schwingungskörpers

Um bei einer allmählichen Frequenzänderung den Übergang der einen Schwingungsform in die andere besser verfolgen zu können, wurde in den Figg. 5 und 6 eine weiß angestrichene Drahtschleife photographiert,

die am oberen Ende durch einen Exzenter in Schwingungen versetzt wurde. Bei ganz tiefen Frequenzen, in der Fig. 5 bei 0,5 Hz, tritt zunächst nur eine parallele Verschiebung der Schleife ein, ohne irgendwelche Deformation, wodurch zwei Knotenstellen entstehen. Mit zunehmender Frequenz wandern wegen der gleichzeitigen Deformation die Knoten immer mehr nach abwärts, bis schließlich oben zwei neue Knoten erscheinen, wobei sich gleichzeitig die Phase der dem Exzenter gegenüberliegenden Seite sprunghaft umkehrt. Dasselbe ist auch in Fig. 2 deutlich sichtbar. Bei einer weiteren Erhöhung der Frequenz tritt wiederum wie die Fig. 6 für 9 Hz zeigt, ein Abwandern der Schwingungsknoten ein. Beim Übergang zwischen zwei Schwingungsformen treten oft laufende Wellen auf, die längs des ganzen Schleifenumfanges die gleiche Amplitude besitzen, wie die Fig. 6 für 11,0 Hz zeigt.

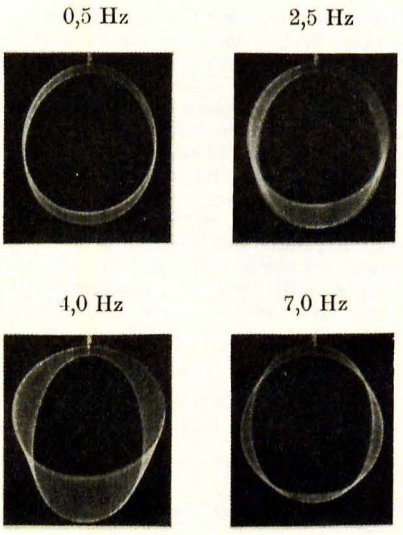

Fig. 5.

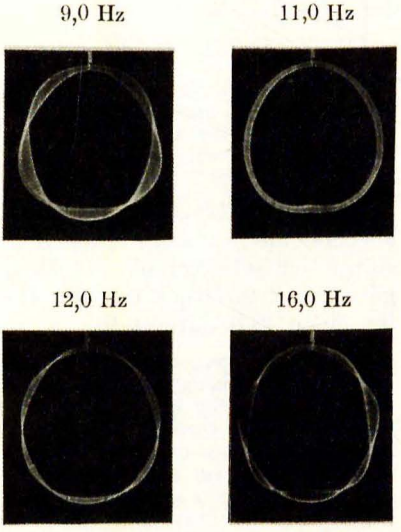

Fig. 6.

Knotenbildung bei einer schwingenden Schleife

III. Hörschwellenmessungen

Für die Messung der Hörschwelle des Knochenleitungstones ist es wegen des Auftretens der Schwingungsknoten wichtig, die Stelle, auf die man die Schwingungen überträgt und die Stelle, wo man sie mißt, ein für allemal festzulegen. Wir empfehlen hierfür die Mitte des Stirnbeines, da wegen seiner recht gleichförmigen Dicke die Schwingungsform hier sehr regelmäßig ist und selbst eine Verschiebung der Druckstelle des Schwingungskörpers um 3 cm auf die Lautstärke des Knochenleitungstones keinen Einfluß hat. Die auf den Knochen übertragene Schwingungsamplitude mißt man aus dem gleichen Grunde am besten unmittelbar in etwa 2 bis 4 cm Entfernung von der Druckstelle, wobei sich bei dem Stirn-

bein für das ganze Gebiet um den Schwingungskörper herum wegen der großen Wellenlänge bis zu Frequenzen von 2000 Hz die gleichen Meßwerte ergeben. Der Warzenfortsatz z. B. ist bedeutend ungeeigneter, da eine geringe Verschiebung der Druckstelle große Änderungen der übertragenen Schwingungsamplitude ergibt, je nachdem die Haut unmittelbar auf dem Knochen aufliegt oder die dort angreifenden kräftigen Sehnen dazwischen kommen. Außerdem läßt sich bei tiefen Frequenzen die Tastempfindung bei der Druckstelle an der Stirn besser von der Hörempfindung trennen.

Die Größe der Druckfläche des Schwingungskörpers wählt man schwach linsenförmig und gibt ihr keinen größeren Durchmesser als 7 mm, damit bei einem nicht vollkommen vertikalen Aufsetzen des Schwingungskörpers sich die Übertragungsgüte nicht ändert. Bei dieser Druckfläche kann man auf die Dauer höchstens 250 g Druck anwenden, wie es auch in Fig. 1 dargestellt ist.

Mißt man die Amplitude des auf die Stirn aufgesetzten Schwingungskörpers und die Amplitude des Stirnbeines in der unmittelbaren Nähe, so erhält man die durch die Haut auf den

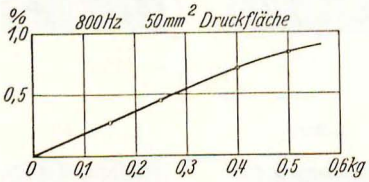

Fig. 7. Die durch die Haut auf das Stirnbein übertragene Schwingungsamplitude des Druckkörpers in Abhängigkeit vom Druck

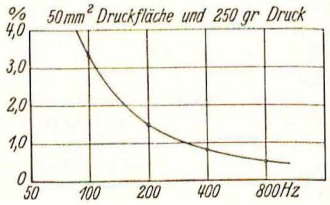

Fig. 8. Die Übertragungsgüte der Schwingungen durch die Kopfhaut in Abhängigkeit von der Frequenz

Knochen übertragenen Teile der Amplitude des Schwingungskörpers, die nur einige Prozent beträgt und je nach der Hautstärke sich sehr verändert. Die Abhängigkeit der Übertragungsgüte von dem Druck und der Frequenz ist in den Figg 7 und 8 für einen Fall dargestellt.

Um zu zeigen, daß bei dem benutzten Druck von 250 g durch die Haut die Schwingungen unabhängig von ihrer Größe übertragen werden, dient die Schaltung in Fig. 9. Hier wird die Haut zwischen dem Zeigefinger und dem Daumen zwischen dem elektrodynamisch angetriebenen Schwingungskörper und eine größere Masse M gespannt. Die Masse M wurde dabei so gewählt, daß ihre Amplitude im Verhältnis zu der des Schwingungskörpers im gleichen Verhältnis stand wie beim Kopfe. Mit M wurde starr die Tauchspule eines elektrodynamischen Lautsprechers verbunden. Es ist dann sicherlich die bei der Bewegung in der Tauchspule entstehende EMK proportional der Amplitude. Die EMK wird mittels der Eichleitung b_2 unter Benutzung des Phasendrehers derart kompensiert, daß hinter den beiden Verstärkern und dem Sieb Tonminimum eintritt. Um bei 400 Hz bis zu Amplituden von 10^{-10} cm hinunterzukommen,

mußten zwei getrennt aufgestellte Verstärker mit besonderer Schirmung verwendet werden.

Verstellt man nun mittels der Eichleitung b_1 die Amplitude des Schwingungskörpers von 10^{-3} cm bis auf 10^{-10} cm, so zeigt sich, daß auch die Kompensationsspannung bis auf etwa 30 Proz. genau im gleichen Verhältnis geändert werden mußte. Diese Proportionalität zwischen dem Betriebsstrom des Schwingungskörpers und der durch die Haut übertragenen Amplitude ist deshalb von Bedeutung, da bei der Bestimmung

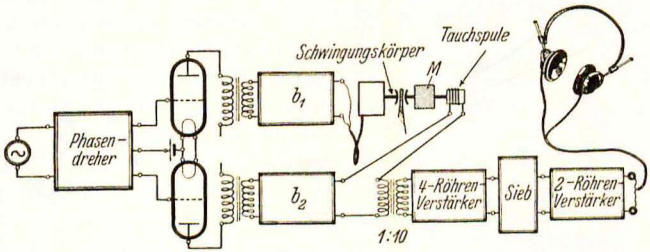

Fig. 9. Zum Nachweis der Proportionalität zwischen der an dem Schwingungskörper angelegten Spannung und der Amplitude des Schwingungskörpers und der durch die Haut übertragenen Schwingungen

der Hörschwelle des Knochenleitungstones die Messung der Schwingungsamplitude des Stirnbeines bei etwa 10mal größeren Amplituden ausgeführt werden mußte, als der Hörschwelle entsprach. Die weitere Amplitudenverkleinerung wurde durch eine vor dem Schwingungskörper geschaltete Eichleitung hergestellt.

Der Fehler von etwa 30 Proz. ist bedeutungslos, da die Beobachtungsfehler meist größer sind. Denn außer den Beobachtungsfehlern, wie das Wandern der Aufmerksamkeit, der Ermüdung usw., wie sie schon von der Messung der Hörschwelle bei Luftleitung her bekannt sind[1]), kommt hier noch hinzu, daß sich die Lautstärke des Knochenleitungstones beim Verschieben des Unterkiefers aus seiner normalen Lage verändert und auch beim Zusammenbeißen der Zähne, besonders bei tiefen Frequenzen, starke Schwankungen auftreten.

Für praktische Zwecke genügt es jedenfalls, die Hörschwelle der Knochenleitung in Abhängigkeit von der Amplitude des auf den Kopf gesetzten Schwingungskörpers zu messen, wie das eben von Knudsen[2]) ausgeführt wurde. Für theoretische Betrachtungen ist es jedoch zweckmäßig, die durch die Haut erfolgende Übertragung der Schwingungsamplitude des Druckkörpers, die sich je nach der Form des Druckkörpers, dem Druck und der Frequenz meist schon von Messung zu Messung stark verändert, dadurch zu eliminieren, daß man nicht die Amplitude des Schwingungskörpers, sondern unmittelbar die des Knochens mißt.

1) E. Waetzmann u. H. Heisig, Ann. d. Phys. [5] **9**. S. 921. 1931.
2) Vern O. Knudsen u. Isaac H. Jones, Arch. of Otolaryngology. **13**. S. 489. 1931.

In der Fig. 10 sind durch die gestrichelte Kurve die erhaltenen Amplituden an der Stirn für die Hörschwelle bei offenem Gehörgang eingetragen. Verschließt man ein Ohr lose mit einem Gummistopfen, der eine Kapillare besitzt, so daß sich durch die Kapillare eine eventuelle Druckdifferenz zwischen dem Gehörgang und dem Außenraume ausgleichen kann, so beobachtet man in dem untersuchten Frequenzbereich eine bedeutende Lautstärkenerhöhung, derzufolge die Hörschwelle sich merklich erniedrigt, wie die stark ausgezogene Kurve in der Figur darstellt.

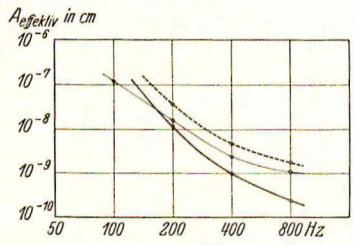

Fig. 10.
- - - - Hörschwelle des Knochenleitungstones bei offenem Gehörgang
——— Hörschwelle des Knochenleitungstones bei geschlossenem Gehörgang
——— Hörschwelle der Schwingungen eines den Gehörgang von außen abschließenden Körpers

Während im ersten Falle normalerweise die Lautstärke des Knochenleitungstones in beiden Ohren gleich groß ist, d. h. das Schallbild in der Mitte des Kopfes erscheint, so rückt im zweiten Falle das Schallbild vollkommen in das verschlossene Ohr (Weberscher Versuch), so daß auch die Aufmerksamkeit entsprechend umgestellt werden muß.

Um zu beweisen, daß bei den tiefen Frequenzen die Hörempfindung durch die Tastempfindung nicht gestört wird, wurde die Unterschiedsschwelle der Tonhöhenänderung für die Knochenleitung gemessen und vollkommen identisch mit der für Luftleitung gefunden, während für die Tastempfindung sich bedeutend größere Werte ergaben, so daß eine Verdeckung der Hörempfindung eine Verschlechterung der Unterschiedsschwelle für die Knochenleitung hätte ergeben müssen. Vergrößert man jedoch die Amplitude des Schwingungskörpers, so erreicht schließlich auch die Tastempfindung ihre Schwelle, womit sich meist das Schallbild in der Richtung nach dem Schwingungskörper verschiebt.

Um die für die Knochenleitung erhaltenen Werte mit der Hörschwelle für Luftleitung besser vergleichen zu können, wurde mit der gleichen Amplitudenmeßanordnung und den gleichen Beobachtern eine absolute Hörschwellenbestimmung für Luftleitung durchgeführt.

Führt man den in der Fig. 11 dargestellten Schwingungskörper von 7 mm Durchmesser in den Gehörgang ein, so wird durch seine Bewegungen die Luft im Gehörgang abwechselnd komprimiert und verdünnt, wobei die entstehenden Druckschwankungen aus dem Volumen des Gehörganges, durch

Wasserfüllung zu 0,8 cm^3 bestimmt, und aus der Schwingungsamplitude des Körpers berechnet werden können. Damit beim Einführen des Schwingungskörpers in den Gehörgang kein Überdruck entsteht, wurde, wie in Fig. 11 gezeigt, in den Schwingungskörper eine Glaskapillare eingeklebt, deren akustische Impedanz bei einem Kapillardurchmesser von $2 \cdot 10^{-2}$ cm bereits so groß ist, daß damit die im Gehörgang entstehenden Druckschwankungen nicht beeinflußt werden. Um ein seitliches Abströmen der Luft längs des Druckkörpers zu vermeiden, dichtet man den Gehörgang mit Vaselin ab.

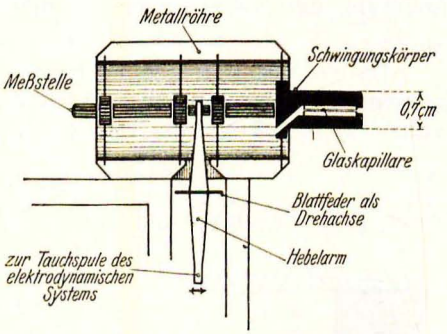

Fig. 11. Schwingungskörper zur Messung der Hörschwelle für Luftleitung

Nachdem durch Vormessungen bestätigt wurde, daß der Schwingungskörper mit der gleichen Amplitude schwingt wie die über eine längere Stange gekoppelte Meßstelle, so konnte an derselben die Amplitude des Schwingungskörpers etwa beim 10fachen der Hörschwelle gemessen werden, wobei die weitere Amplitudenverkleinerung bis zur Hörschwelle durch eine vor das elektrodynamische System geschaltete Eichleitung in meßbarer Weise durchgeführt werden konnte.

Die für die Hörschwelle erhaltenen Amplituden sind in der Fig. 10 durch die dünn ausgezogene Kurve dargestellt.

Da bei unrichtiger Lage des Schwingungskörpers in dem Gehörgang die Schwingungen auch leicht auf die Knochen übertragen werden können, so ist immer zu überprüfen, ob beim losen Verschluß des anderen Ohres, z. B. mit dem Finger, sich die Lautstärke des Schallbildes nicht ändert. Denn ist ein Knochenleitungston in merklicher Stärke vorhanden, so tritt beim Ohrenverschluß, wie die Fig. 10 zeigt, eine sehr starke Lautstärkenerhöhung des Knochenleitungstones im betreffenden Ohre ein, wodurch das Schallbild des durch den Schwingungskörper entstehenden Luftleitungstones sofort ihre Form und Lage ändert und nach der mit dem Finger verschlossenen Seite hinüberwandert.

Um aus den Schwingungsamplituden der Fig. 10 des in den Gehörgang gesteckten Körpers die Druckschwankungen im Gehörgang zu ermitteln, betrachten wir die Fig. 12. Verschiebt sich der Druckkörper, dessen Querschnitt mit S_0 bezeichnet ist, um x_0, so verschiebt sich das Trommelfell mit dem Querschnitt S

nach der gleichen Richtung um x, da das Trommelfell der im Gehörgang entstehenden Druckerhöhung nachgibt. Die durch die Verschiebung des Druckkörpers entstehende Volumenänderung des Gehörganges mit dem Volumen V ist

$$dV = S\,x - S_0\,x_0\,.$$

Da wir wegen der hohen Frequenz der Verschiebungen annehmen können, daß sich die Volumenänderung adiabatisch vollzieht, so beträgt die Druckänderung

$$(1) \qquad p = -\varrho\,c^2\frac{dV}{V} = \frac{\varrho\,c^2}{V}S_0\,x_0 - \frac{\varrho\,c^2}{V}S\,x\,,$$

wobei ϱ die Gasdichte und c die Schallgeschwindigkeit im freien Raume angibt. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Abmessungen des Gehörganges klein gegenüber der Wellenlänge im freien Raume ist, was für den hier betrachteten Frequenzbereich zutrifft.

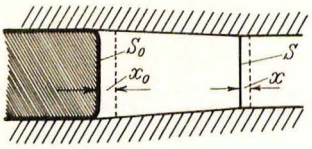

Fig. 12. Berechnung des Einflusses der Trommelfellnachgiebigkeit auf die Hörschwelle

Definieren wir nun mit Stewart[1]) als akustische Impedanz Z irgendeines Systemes mit der Öffnung S das Verhältnis vom Druck p zu der Volumenverschiebung pro Zeiteinheit, die an der Öffnung des Systemes von den Stoffteilen ausgeführt wird:

$$(2) \qquad Z = \frac{p}{S\frac{dx}{dt}},$$

so ergibt sich für die sinusförmigen Schwingungen der Kreisfrequenz ω:

$$(3) \qquad x = a\,e^{i\omega t}, \qquad Z = \frac{p}{i\,\omega\,S\,x}.$$

Wir erhalten daher für die Druckänderungen aus Gl. 1:

$$(4) \qquad p = \frac{\varrho\,c^2}{V}S_0\,x_0\,\frac{1}{1 + \frac{\varrho\,c^2}{V}\cdot\frac{1}{i\,\omega\,Z}}.$$

Für ein schallhartes Ohr wäre $x = 0$, daher $Z = \infty$, so daß der Bruch auf der rechten Seite der Gl. 4 zu 1 wird. Es stellt daher dieser Bruch die Korrektur wegen der Schallweichheit des Trommelfelles dar.

Nun hat J. Tröger[2]) die Impedanz des Trommelfelles eingehend gemessen. Da er jedoch unter Impedanz das Verhältnis

1) G.W. Stewart u. R. B. Lindsay, Acoustics, New York, S. 50. 1930.
2) J. Tröger, Phys. Ztschr. **31**. S. 26. 1930.

von Druck zur Teilchengeschwindigkeit versteht, so sind seine Werte gemäß Gl. 2 noch durch S, den Querschnitt des Gehörganges an der Meßstelle, zu dividieren. Da die verwandte Röhre einen Durchmesser von 7 mm hatte, so sind seine Impedanzwerte mit 2,6 zu multiplizieren, um unserer Definition zu entsprechen.

Zerlegen wir die so erhaltene Impedanz in ihre reellen und imaginären Bestandteile

$$Z = A + i\,B\,,$$

so ergibt sich für den Absolutwert des Nenners in dem Bruch der Gl. 4:

$$\left| 1 + \frac{\varrho\, c^2}{V} \cdot \frac{1}{i\,\omega\, Z} \right| = \sqrt{\frac{A^2 + \left(B - \frac{\varrho\, c^2}{V\,\omega}\right)^2}{A^2 + B^2}}\,.$$

Setzt man nun in diese Gleichung für $\varrho = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$, $c = 3{,}4 \cdot 10^4$ cm s^{-1}, $V = 0{,}8$ cm^3, und für A und B die mit 2,6 multiplizierten Werte von Tröger auf S. 38, die für eine Versuchsperson gelten, ein, so ergeben sich für die verschiedenen Frequenzen folgende Werte:

Tabelle 1

Frequenz	250	450	800	1000	1500	3000
$\left\| 1 + \frac{\varrho\, c^2}{V} \cdot \frac{1}{i\,\omega\, Z} \right\|$	2,8	2,7	3,5	1,7	2,0	1,4

Oberhalb 800 Hz treten wegen der Resonanzerscheinungen der Gesamtmembran und einzelner Teile sehr schwankende Werte auf, die im Mittel etwa 1,6 betragen.

Man ersieht aus diesen Zahlen, daß der Schalldruck im Gehörgang durch die Nachgiebigkeit des Trommelfelles maximal um das 3,5fache verkleinert wird. Vgl. hiermit die Ausführungen von B. Langenbeck[1]) und E. Waetzmann und H. Heisig.[2]) Die erhaltene Nachgiebigkeit des Trommelfelles erscheint sehr groß, indem bei einer 3,0fachen Schalldruckverkleinerung die Volumenverschiebung des Trommelfelles trotz der leichten Komprimierbarkeit der Luft im Gehörgange nur um etwa 33 Proz. kleiner ist als die des Schwingungskörpers. Trotzdem spielt die Trommelfellnachgiebigkeit bei den Hörschwellenmessungen mit dem Thermophon eine kleine Rolle, da in diesen Fällen das Volumen V meist bedeutend größer ist.

1) B. Langenbeck, Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **226**. S. 11. 1930.
2) E. Waetzmann u. H. Heisig, Ann. d. Phys. [5] **9**. S. 921. 1931.

Berechnet man nun unter Berücksichtigung obiger Werte aus Fig. 10 und der Gl. 4 die Hörschwelle für die Luftleitung, so ergibt sich

Tabelle 2

Frequenz . . .	100	200	400	800
Effektiver Druck in 10^{-4} Dyn/cm^2	270	40	5,9	2,2

welche Werte sich besonders den Messungen von E. Mayer[1]) anschließen.

Die im Schwingungskörper befindliche Kapillare hatte einen Radius von 10^{-2} cm und eine Länge von 1,0 cm. In diesem Falle ist, wie die Untersuchungen von I. B. Crandall[2]) zeigen, die Reibungskraft in der Röhre schon so groß, daß bei den Schwingungen der Gassäule ihre Massenkräfte vernachlässigt werden können. Es ist daher gemäß dem Poiseuilleschen Gesetz das pro Zeiteinheit durch die Röhre fließende Gasvolumen gegeben durch

$$S\frac{dx}{dt} = \frac{\pi}{8}\frac{r^4 p}{\mu l},$$

wobei $\mu = 1{,}87 \cdot 10^{-4}$ cgs den Reibungskoeffizienten der Luft, l die Röhrenlänge und r den Innenradius der Röhre angibt. Für die akustische Impedanz dieses Systems ergibt sich nach Gleichung (2)

$$Z = \frac{8\mu l}{\pi r^4} = 48\,000 \text{ cgs}.$$

Es ist somit die Röhrenimpedanz gegenüber der Trommelfellimpedanz selbst bei den tiefen Frequenzen so groß, daß die Röhre auf die Messungen keinen Einfluß hat. Eine Vaselindichtung sorgte dafür, daß sonst keine Öffnungen vorhanden blieben.

Bereits Vern. O. Knudsen und I. H. Jones[3]) haben festgestellt, daß ein Geräusch im Meßraum die Hörschwelle für Knochenleitung weniger beeinflußt wie die der Luftleitung. Dies kommt davon her, daß bei der Luftleitung, wo der Fernhörer meist an dem Ohre liegt, das Schallbild des Luftleitungstones mit dem des Geräusches fast zusammenfällt, da wegen dem vor dem Ohre liegenden Fernhörer die Entfernungsempfindung für das Geräusch verlorengeht und es ebenfalls in unmittelbarer Nähe des Gehörganges lokalisiert wird. Beim Knochenleitungston dagegen erscheint das Schallbild des Knochenleitungstones im Innern des Kopfes und von dem außerhalb des Kopfes liegenden Geräuschschallbild vollkommen getrennt, so daß wegen der räumlichen Trennung eine geringere Ablenkung der Aufmerksamkeit erfolgt.

1) E. Mayer, Ztschr. f. Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde. **27**. S. 418. 1930.

2) I. B. Crandall, Theory of vibrating systems and sound. S. 235. New York 1926.

3) Vern. O. Knudsen u. I. H. Jones, a. a. O.

In Fig. 13 ist dargestellt, um das Wievielfache sich die Hörschwelle eines Luftleitungstones und die eines Knochenleitungstones erhöht, wenn dem eben hörbaren Ton veränderlicher Frequenz einseitig ein Luftleitungston von 900 Hz überlagert wird, dessen Lautstärke das 100 fache der Hörschwelle beträgt. Der Luftleitungston wurde dabei von einem in 2 cm Entfernung vom Ohre befindlichen Fernhörer erzeugt. Während die Verdeckung des Luftleitungstones durch den stärkeren Ton von 900 Hz den Messungen von R. L. Wegel und C. E. Lane[1]) entspricht, wird der am Warzenfortsatz erzeugte Knochenleitungston durch den auf der gleichen Seite befindlichen Luftleitungston kaum verdeckt, da der Knochenleitungston auch auf dem anderen ungestörten Ohre mit fast gleicher Lautstärke gehört wird.

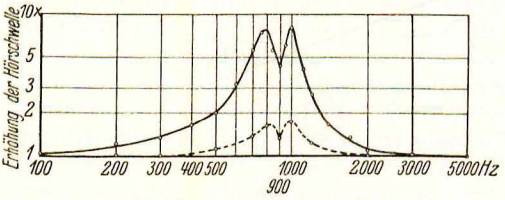

Fig. 13. Bei ungleichartiger einseitiger Schallleitung ist die Tonverdeckung bedeutend kleiner als bei gleichartiger

IV. Die Schallaufnahme bei geschlossenem Gehörgang

Um die Lautstärkenerhöhung des Knochenleitungstones bei Verschluß des Gehörganges genauer zu messen, stellt man zunächst auf beiden Seiten zwei Fernhörer, die sich etwa 2 cm entfernt vom Kopfe befinden, vermittelst der Eichleitung b_1 und dem Umschalter U_2 in der Fig. 14 so ein, daß das entstehende Luftleitungsschallbild sich genau in der Mittelebene des Kopfes befindet. Auch auf die richtige Phase der beiden Fernhörer ist zu achten. Den Knochenleitungston erzeugt man an einer solchen Stelle der Stirn, daß sein Schallbild bei offenen Ohren sich nicht von dem Schallbild des Luftleitungstones unter-

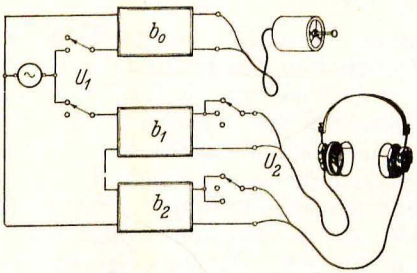

Fig. 14. Meßanordnung für die Lautstärkenerhöhung bei Ohrenverschluß

1) R. L. Wegel u. C. E. Lane, Phys. Rev. **23.** S. 266. 1924.

scheidet. Durch abwechselndes Einschalten eines der Schallbilder durch den Umschalter U_1 stellt man zwischen beiden Bildern mit der Eichleitung b_0 Lautstärkengleichheit her. Fallen die beiden Schallbilder der Richtung nach zusammen, und sind sie gleich laut, so ist man sicher, daß in jedem einzelnen Ohre die Lautstärke des Knochenleitungstones derjenigen des Fernhörers gleich ist. Verschließt man nun eines der Ohren mit dem früher beschriebenen Gummistopfen, so rückt das Schallbild des Knochenleitungstones vollständig in den verschlossenen Gehörgang, so daß die Lautstärke gut mit der Lautstärke des nun nur im anderen Ohre ertönenden Luftleitungstones verglichen werden

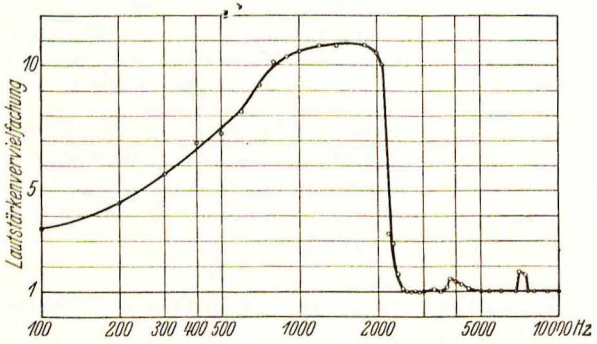

Fig. 15. Lautstärkenvervielfachung des Knochenleitungstones bei Ohrenverschluß

kann. Verstellt man nun dessen Eichleitung so lange, bis beim Umschalten von U_1 die Lautstärkengleichheit hergestellt ist, so gibt die Änderung der Eichleitung die Lautstärkenerhöhung beim Verschluß des Gehörganges an. Die erhaltenen Meßwerte sind in der Fig. 15 dargestellt. Oberhalb 2000 Hz hört die Lautstärkenerhöhung sprunghaft auf, was meist mit einer Änderung der Schwingungsform der Schädelkapsel verbunden ist, womit sich die Schwingungsverhältnisse im Gehörgang und im Innenohr ändern. Da die obige Meßmethode nur richtig ist, wenn die Lautstärkenvergrößerung wenigstens das 3fache beträgt, so daß das Schallbild vollkommen seitlich erscheint, so wurden die kleinen Änderungen oberhalb 2000 Hz geschätzt.

Verschließt man das Ohr nicht durch den mit der Kapillare versehenen Gummistopfen, sondern mit dem Finger, so tritt beim losen Abschluß die frühere Lautstärkenerhöhung ein, während bei festeren Eindrücken die Lautstärke wiederum abnimmt.

zusammenfassende Darstellung der hierher gehörigen Fragen E. Mach[1]), der durch seine „Schallabflußtheorie" die erste geliefert hat, hält es für wahrscheinlich, daß die Lautstärkenabnahme durch das feste Anpressen des Fingers an den Schädel entsteht, indem hierdurch der Schallabfluß durch den Finger befördert wird.

Doch kann man leicht beobachten, daß beim festen Andrücken einer größeren Bleimasse an den Warzenfortsatz sich die Lautstärke des Knochenleitungstones, bei einem auf der Stirne befindlichen Schwingungskörper, nur unwesentlich ändert, indem, wie die Fig. 8 zeigt, besonders bei höheren Frequenzen die dazwischenliegende Hautschicht ein Abbremsen der Schädelschwingungen durch die aufgelegte Bleimasse sehr erschwert. Vielmehr tritt die Lautstärkenabnahme dadurch ein, daß sich beim festen Einpressen des Fingers in den Gehörgang der Luftdruck gegenüber seinem normalem Wert ändert, wodurch das Trommelfell mit den Gehörknöchelchen seine ursprüngliche Lage verliert und auch ihre Beweglichkeit abnimmt.

Daß die Luftdruckänderung hier maßgebend ist und für diesen Fall die Schallabflußtheorie nicht herangezogen werden kann, zeigt auch folgender Versuch. Bestreicht man den Finger mit einem Dichtemittel und schiebt ihn von der Seite her in das Ohr, so gelingt es, das Ohr so abzuschließen, daß man den Finger noch nach außen bewegen kann, ohne daß die Dichtung nachläßt. Es tritt dann auch bei einer Verminderung des Fingerdruckes eine Lautstärkenabnahme ein, solange die Dichtung nicht nachläßt. Ähnlich wie eine Luftdruckänderung wirkt auch die z. B. mit einem kurzen Röhrenstück verschobene Haut des Gehörganges, die ebenfalls einen Druck auf das Trommelfell überträgt.

Um festzustellen, ob die Lautstärkenänderung bei einer Druckänderung im Gehörgang tatsächlich bloß durch die Bewegungsverminderung des Trommelfelles und der Gehörknöchel entsteht, messen wir die Impedanzänderung des Trommelfelles. Denn wie die Gl. 2 zeigt, entspricht einer Beweglichkeitsverminderung auch eine Impedanzerhöhung des Trommelfelles.

Da diese Messungen nur bei tiefen Frequenzen unterhalb 800 Hz auszuführen sind, wo sich das Trommelfell bei den Schwingungen noch nicht unterteilt, so schließen wir den Gehörgang mit einem kleinen Röhrenstück von etwa 1 cm^3 Volumen ab, auf dessen anderer Seite sich eine mit konstanter Amplitude schwingende Fernhörermembran befindet. Es ent-

1) E. Mach, Theorie des Gehörganges. Sitzber. d. Wien. Akad. d. Wiss. 48. Nat.-Kl. S. 289. 1863. Eine schöne zusammenfassende Darstellung bei K. L. Schaefer u. M. Giesswein im Handb. der Ohrenheilkunde von Denker u. Kahler, Bd. 6, Gehörorgan I, 1926.

steht dann im Gehörgang ein Schalldruck p, der durch die Gl. 4 gegeben ist, wobei jetzt V das Volumen des Gehörganges vermehrt und das des Röhrenstückes angibt. Entfernen wir nun die Röhre mit der schwingenden Membran aus dem Gehörgang und schließen sie mit einer Kapsel ab, deren Volumen genau gleich dem des Gehörganges ist, so besteht der Fall, als wäre die Impedanz des Trommelfelles unendlich groß und es wird der Schalldruck

$$p_\infty = \frac{\varrho\, c^2}{V} S_0\, x_0 .$$

Aus dem Verhältnis dieser beiden Drucke bestimmt sich die Impedanz des Trommelfelles zu

$$Z = \frac{\varrho\, c^2}{i\,\omega\, V\left(\frac{p_\infty}{p} - 1\right)} . \tag{5}$$

Um das Verhältnis p_∞/p der beiden Drucke zu bestimmen, dient die Anordnung in der Fig. 16. Links befindet sich ein Fernhörer, auf dessen Membranmitte ein Übertragungsstück befestigt ist, durch das die Zelophanmembran des Meßvolumens in Schwingungen versetzt wird. Wählt man die Fernhörermembran genügend stark, so ist es leicht zu erreichen, daß die Schwingungsamplitude der Membran sich bei einer Änderung der Schalldruckschwingungen in dem Meßvolumen nicht ändert, da die Schalldruckkräfte gegenüber den elastischen Kräften der Fernhörermembran zu vernachlässigen sind. Rechts befindet sich ein Kompensationsmikrophon nach H. Tischner[1]), bei dem die auf die Fernhörermembran und der mit ihr gekoppelten Kompensationsmembran wirkenden elektromagnetischen Kräfte der Größe und Phase nach so eingestellt werden, daß sie den Druckkräften des Schalles in dem Meßvolumen

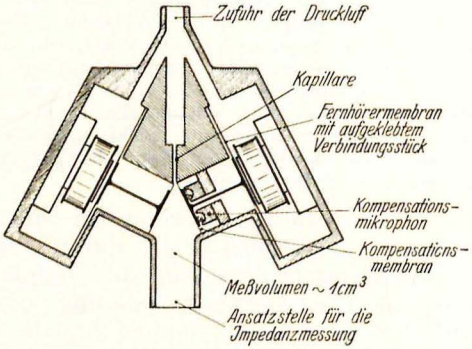

Fig. 16. Anordnung zur Messung akustischer Impedanzen bei tiefen Frequenzen

1) H. Tischner, E. N. T. 7. S. 192. 1930; E. Meyer, E. N. T. 4. S. 86. 1927.

eben gleichen. Dann bleibt die Kompensationsmembran vollkommen in Ruhe, was durch das Mikrophon angezeigt wird. Das Verhältnis der beiden Schalldrucke ist daher auch der Phase nach durch das Verhältnis der Ströme des Kompensationsfernhörers gegeben.

Will man mit dieser Anordnung auch bei höheren Frequenzen messen, so füllt man zweckmäßig das Meßvolumen mit Wasserstoff, indem man durch zwei entsprechend dimensionierte Kapillaren dauernd das Meßvolumen durchströmen läßt. Da die Schallwellenlänge dabei etwa 4mal größer wird, so kann auch die Meßfrequenz entsprechend vergrößert werden.

Für die Messung der akustischen Impedanz irgendeines an die Ansatzstelle des Meßvolumens angeschlossenen Systemes bedeutet V in der Gleichung (5) das Meßvolumen der Fig. 16, p den Druck bei angeschlossener Impedanz und p_∞ den Druck, wenn die Ansatzstelle des Meßvolumens durch eine ebene Platte verschlossen wird.[1])

Bedeutet nun Z_0 die Impedanz des Trommelfelles ohne äußeren Druck im Gehörgang und Z_h die Impedanz bei geändertem Druck, so erhalten wir aus Gl. 5 für das gesuchte Verhältnis der beiden Impedanzen, wenn wir die in unserem Falle etwa 1prozentige Änderung von $\varrho\, c^2$ vernachlässigen

$$\frac{Z_h}{Z_0} = \frac{\frac{p_\infty}{p_0} - 1}{\frac{p_\infty}{p_h} - 1}. \tag{6}$$

In der Tab. 3 sind einige bei 400 Hz und einer Druckerhöhung von 10 cm Wassersäule erhaltenen Impedanzänderungen mit den dazugehörigen, durch Lautstärkevergleich mit dem anderen Ohre gemessenen Lautstärkeänderungen eingetragen.

Tabelle 3

Impedanzänderung Z_h/Z_0 . .	2,1	1,8	1,5
Lautstärkenänderung L_0/L_h .	2,7	2,0	1,35

Trotzdem diese Messungen schlecht reproduzierbar sind, da die Gehörknöchel sich meist ruckweise in die neue Gleichgewichtslage einstellen, so zeigen sie doch deutlich, daß durch eine Druckerhöhung im äußeren Gehörgang sich die Impedanz des Trommelfelles vergrößert, so daß seine Schwingungsamplituden kleiner werden und daß die Lautstärkenänderungen ungefähr von der gleichen Größenordnung sind. Es ist damit entschieden, daß die Lautstärkenänderungen mechanisch ent-

[1]) Andere Methoden der Impedanzmessung, G.W. Stewart, Phys. Rev. 28. S. 1038. 1926; G.W. Stewart u. R. B. Lindsay, Acoustics, New York, S. 190, 1930; J. Tröger, a. a. O.

stehen, so daß die Annahme einer Änderung der Nervenempfindlichkeit bei einer eventuellen Erhöhung des Druckes in der Schneckenflüssigkeit nicht notwendig ist.

Die vollkommene Gleichheit zwischen der Impedanzänderung und der Lautstärkenänderung ist deshalb nicht zu erwarten, da die Kopplung zwischen dem Trommelfell und den Gehörknöcheln nur für einen Teil des Trommelfelles eine vollkommen feste ist, während der seitliche Teil des Trommelfelles, wie Beobachtungen am Ohrenmikroskop zeigen, mehr oder weniger unabhängig schwingt und in anderer Weise bei der Druckerhöhung seine Impedanz ändern kann.

Bei einer Druckerniedrigung ist ebenfalls eine Lautstärkenverminderung mit einer Erhöhung der Trommelfellimpedanz verbunden.

Um die einer Druckänderung entsprechende Lautstärkenänderung eines Luftleitungstones mit der eines Knochenleitungstones bei verschlossenem Gehörgang besser miteinander vergleichen zu können, dient die Anordnung der Fig. 17. Der vertikale Schenkel des mit der Luftpumpe verbundenen T-Rohres wird so tief unter den Flüssigkeitsspiegel getaucht, bis im Manometer bei Abschluß des Hahnes und der zum Gehörgang führenden Öffnung die gewünschte Druckdifferenz entsteht. Bei dem in der Metallkapsel befindlichen Fernhörer ist dafür gesorgt, daß die Luft zu beiden Seiten der Membran gleichmäßig herankommen kann, so daß bei Druckänderungen sich die Schallabgabe des Fernhörers nicht ändert. Der zum Gehörgang führende Gummischlauch besitzt an seinem Ende eine enge Kapillare, die den Gehörgang möglichst vollkommen abschließt. Das Ende des Schlauches muß möglichst luftdicht in den Gehörgang eingeführt werden, so daß beim Zudrücken des Gummischlauches sich die Manometerstellung nicht ändert, da sich nämlich zeigte, daß bei einem schon geringfügigen Strömen der Luft durch die Kapillare die Schallstärke der ebenfalls durchtretenden Schallwellen des Fernhörers stark ge-

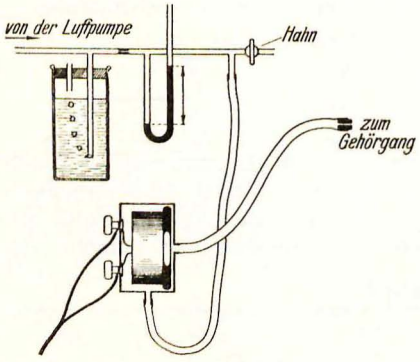

Fig. 17.
Messung der Lautstärkenänderung bei einer Druckänderung im Gehörgang

schwächt werden. Aus diesem Grunde wurde auch der Innendruckmesser der Kapillare nicht kleiner als 0,5 mm gewählt.

Um für die Luftleitung die einer Druckänderung entsprechende Lautstärkenänderung zu bestimmen, wird der Fernhörer automatisch beim Öffnen und Schließen des Hahnes an zwei verschiedene, von der gleichen Stromquelle gespeiste Eichleitungen angeschlossen, die so eingestellt werden, daß durch ihre verschiedene Einstellung die Lautstärkenänderung bei der Druckerhöhung ausgeglichen wird. Die Differenz der beiden Einstellungen ergibt dann die gesuchte Lautstärkenänderung.

Bringt man nun bei ausgeschaltetem Fernhörer den Kopf mit einem Schwingungskörper gleicher Frequenz und einer Amplitude, die ungefähr die gleiche Lautstärke wie der Fernhörer erzeugt, in Berührung, so wird im Gehörgang deutlich ein Schallbild wahrnehmbar, dessen Form und Lage mit dem vom Fernhörer erzeugten Schallbild vollkommen identisch ist. Außerdem entsteht noch bei tiefen Frequenzen an der Berührungsstelle mit dem Schwingungskörper eine Tastempfindung, deren Stärke sich natürlich bei der Druckänderung nicht ändert. Doch gelingt es bei höheren Frequenzen, besonders durch geeignete Wahl der Druckstelle des Schwingungskörpers, die Tastempfindung so weit zu unterdrücken, daß sie nicht mehr stört und auch hier durch Umschalten des elektrodynamisch erregten Schwingungskörpers auf zwei verschiedene Eichleitungen beim Öffnen und Schließen des Hahnes die Lautstärkenänderungen zu messen.

Die unter diesen Vorsichtsmaßregeln bei 400 und 800 Hz ausgeführten Messungen zeigten, daß für die Druckerhöhungen und Druckverminderungen die Lautstärkenänderungen im geschlossenen Gehörgang für Luftleitung und Knochenleitung einander vollkommen gleichen, solange die Lautstärkenverminderungen nicht mehr als das Dreifache betragen, indem bei einer größeren Änderung bereits das Schallbild des Knochenleitungstones nicht mehr in den Gehörgang lokalisiert wird.

Die Tatsache, daß bei geschlossenem Gehörgang das Schallbild des Knochenleitungstones sich seiner Form und Lage nach in keiner Weise von dem durch den Gummischlauch der Fig. 17 erzeugten Luftleitungsschallbild unterscheidet, weist darauf hin, daß bei geschlossenem Gehörgang der Knochenleitungston hauptsächlich durch Luftdruckschwankungen im Gehörgang entsteht. Nur so wird es auch verständlich, daß eine Fixierung des Steigbügels die beiden Schalleitungsarten ganz gleichartig beeinflußt und warum ein Verschluß des Gehörganges die Lautstärke in so hohem Maße vergrößert.

Verwendet man in Fig. 17 den Fernhörer vermittelst eines Verstärkers als Mikrophon, so läßt sich bei Knochenleitung zeigen, daß bei der Druckerhöhung im geschlossenen Gehörgang die Schallstärke zunimmt. Auch dies ist nur dadurch zu erklären, daß die Schallstärke im Gehörgang durch die Kontraktionen des Gehörganges entstehen und bei einer Impedanzerhöhung des Trommelfelles dieselben Volumenänderungen größere Druckschwankungen erzeugen.

Als Ursache des Schalldruckes im Gehörgang sind außer einer direkten Kompression des Gehörganges infolge der Schwingungen der Schädelkapsel hauptsächlich die Schwingungen des Unterkiefergelenkkopfes zu berücksichtigen.

Denn drückt man den Gehörgang mit dem Finger zu und bewegt den Unterkiefer, so ist deutlich zu fühlen, wie die um den Gehörgang liegenden Knorpel verschoben werden, wodurch Volumenänderungen entstehen. Auch läßt sich durch Messungen der Schwingungsamplituden zeigen, daß bei den Schwingungen des Kopfes der Unterkiefer nicht gleichartig mitschwingt, so daß besonders wegen dem Phasenunterschied gegenseitige Verschiebungen zwischen dem Kopfknochen und dem Unterkiefer auftreten.

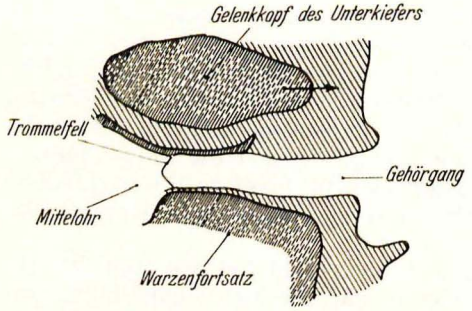

Fig. 18. Längsschnitt durch den Gehörgang, etwa 45° gegenüber der Vertikalebene geneigt

Die Fig. 18, die einen Längsschnitt durch den Gehörgang bei geschlossenem Munde darstellt, zeigt, daß dies auch anatomisch zu erwarten ist.

Ferner ist zu sehen, daß die Schwingungen des Gelenkkopfes das Mittelohr wegen der dazwischen gelagerten dünnen Knochenplatte bedeutend weniger komprimieren als den Gehörgang, wo sich nur verhältnismäßig leicht bewegliche Knorpelplatten befinden. Verschiebt man den Gelenkkopf nach außen, was durch eine seitliche Bewegung des Unterkiefers leicht erhalten wird, so wird der Gehörgang noch bedeutend mehr den Schwingungen des Gelenkkopfes ausgesetzt. Es konnte nun tatsächlich beobachtet werden, wie besonders bei tiefen Frequenzen und seitlicher Schwingung des Unterkiefers bei geschlossenem Gehörgang ein Nachaußenschieben des Gelenkkopfes eine merkliche Lautstärkenerhöhung bewirkt, gleichgültig, ob der Schwingungskörper auf der Seite des Unterkiefers angesetzt wurde oder durch Aufsetzen auf den Warzenfortsatz der Kopf in seitliche Schwingungen versetzt wurde.

Beißt man die hinteren Schneidezähne kräftig zusammen, so wird die relative Bewegung zwischen dem Unterkiefer und dem Schädelknochen vermindert, wodurch eine Lautstärkenabnahme eintritt. Bei höheren Frequenzen und bei Schwingungen des Gelenkkopfes, die nicht parallell der Achse des Gehörganges verlaufen, sind die Lautstärkenänderungen

meist recht verwickelt. Da in diesen Fällen der Unterkiefer meist nicht frei hin und her schwingt, sondern Drehungen ausführt, die oft je nach der Stellung des Unterkiefers in sehr verschiedener und unübersichtlicher Weise durch die vom Gehörgang bereits entfernteren Teile der Gelenkkapsel abgebremst werden.

Wurde der Unterkiefer durch Anlegen des Schwingungskörpers in seitliche Schwingungen versetzt, derart, daß auf dem Kopfe keine Schwingungen übertragen wurden, was durch Abhören mit einem Schallplattentonabnehmer testgestellt werden kann, so zeigte sich, daß bei geschlossenem Gehörgang an der Hörschwelle die Amplituden des Unterkiefers mehrere Male kleiner waren als die Amplituden des in den Gehörgang gesteckten Schwingungskörpers an der Hörschwelle. Da demnach der Unterkiefer bedeutend größere Volumenänderungen im Gehörgang erzielt wie der mit gleicher Amplitude schwingender, in den Gehörgang gesteckter Schwingungskörper, so wird verständlich, warum in der Fig. 10 die Hörschwelle für den Knochenleitungston bei geschlossenem Ohre unter die Hörschwelle des im Gehörgang schwingenden Körpers sinken kann.

V. Die Knochenleitung bei offenem Gehörgang

Ganz anders verhält es sich bei offenem Gehörgang Denn hier können die Kompressionen in dem Gehörgang auf das Trommelfell nur einen kleinen Druck ausüben, so daß die relativen Verschiebungen der Gehörknöchelchen im Mittelohre und die Kompressionen in der Schnecke zur Geltung kommen können. Begünstigt wird dies dadurch, daß auch hier der Unterkiefer infolge seiner Trägheit mit einer anderen Amplitude und Phase schwingt, wie die benachbarten Knochen, so daß er sozusagen eine punktförmige Kraftwirkung auf die Schädelknochen in unmittelbarer Nähe der Schnecke ausübt. Daher ändert sich auch bei offenem Gehörgang die Lautstärke etwas beim Verschieben des Unterkiefers.

Die während der Bewegung auftretenden Veränderungen können nun in erster Annäherung zerlegt werden in eine Parallelschwingung, eine Kompressionsschwingung und eine Drehschwingung der Schnecke und des Mittelohres. Die Drehschwingungen wollen wir vernachlässigen, da die beobachtbaren Erscheinungen beim Knochenleitungston schon durch die Parallelschwingungen und Kompressionsschwingungen vollkommen erklärt werden. Denn würden die Drehschwingungen in der Schnecke eine hörbare Verschiebung der Basilarmembran bewirken, so wäre ihre Schwingungsform eine ganz andere wie bei den Verschiebungen des Steigbügels, so daß die Kompensation des Knochenleitungstones durch einen Luftleitungston nicht möglich wäre.

Die Parallelverschiebung bewirkt besonders im Mittelohr infolge der Trägheit der Gehörknöchelchen eine Kraftwirkung auf den Steigbügel, die bei tiefen Frequenzen ungefähr phasen-

entgegengesetzt den Schwingungen des Mittelohres und Gehörganges ist.

Wird die Schnecke komprimiert, so entstehen, wie A. Rejtö[1]) und H. Herzog[2]) dargelegt haben, bei einer vollständigen Gleichheit der gesamten elastischen Eigenschaften der beiden Schneckenkanäle beiderseits der Basilarmembran die gleichen Druck- und Strömungsverhältnisse, so daß die Basilarmembran gar keine Verschiebungen erleidet, wie dies auch aus der Fig. 19a ersichtlich ist. In Wirklichkeit ist jedoch die Beweglichkeit der Steigbügelplatte ganz bedeutend kleiner als die des runden Fensters, wodurch, wie Fig. 19b zeigt, eine Verschiebung der Basilarmembran entsteht, die um so größer ist, je größer der Unterschied in der Beweglichkeit der beiden Fenster ist. Auf diese Weise scheint besonders die oft beobachtete Tatsache erklärt, nach der eine vollständige Fixation des Steigbügels an der Schneckenwandung das Hören für Luftleitung vollständig aufhebt, während für die Knochenleitung nur eine ganz geringfügige Änderung der Hörschwelle erfolgt. Die Unsymmetrie zwischen den beiden Schneckenkanälen wird noch dadurch vergrößert, daß, wie die Fig. 19c zeigt, in der Nähe des Steigbügels noch die Bogengänge vorhanden sind, deren Kontraktionen noch eine bedeutende Flüssigkeitsverschiebung in der Nähe des Steigbügels bewirken, die vielleicht noch durch über die Blutgefäße eingepreßte Flüssigkeitsmenge vergrößert wird.

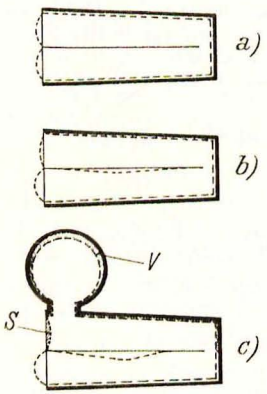

Fig. 19. Bei einer Kompression der Schnecke tritt wegen der Unsymmetrie der beiden Schneckenkanäle eine Verschiebung der Basilarmembran ein

Es ist nun wichtig, nachzuweisen, daß die Kompressionen in der Schnecke einen merklichen Beitrag zu dem Knochenleitungston bei offenem Gehörgang liefern.

Kompensiert man den Knochenleitungston durch einen Luftleitungston vollständig, so daß die Basilarmembran stillsteht, so muß sich der Steigbügel infolge der Kompensation durch den Luftleitungston gerade um ebensoviel nach außen bewegen

1) A. Rejtö, Verhandlungen der deutsch. otolog. Ges. 23. Versammlung. S. 265. 1914.

2) H. Herzog, Ztschr. f. Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde. 27. S. 402. 1930.

als durch die Kompression in den oberen Schneckengang Flüssigkeit hineingetrieben wird.

Ist keine Kompression in der Schnecke vorhanden, so bewegt sich dann während der Kompensation der Steigbügel relativ zu seiner Umgebung gar nicht. Wird daher der Druck im äußeren Gehörgang geändert und der Steigbügel fixiert, so tritt dabei gar keine Veränderung ein. Tritt jedoch in der Schnecke eine Kompression ein, so tritt bei der Bewegungsverminderung des Steigbügels eine größere Lautstärkenänderung auf. Soll nach der Druckerhöhung die Kompensation wiederum hergestellt werden, so muß die verkleinerte Bewegung des Steigbügels durch Vergrößerung der Luftschallstärke wiederum auf ihren ursprünglichen Wert gebracht werden.

Die beiden letzten Folgerungen bestätigten sich sehr gut. Die vollständige Kompensation der Flüssigkeitsbewegung gelingt deshalb so gut, weil die Öffnung der Bogengänge sehr nach dem Steigbügel liegt.

Während bei geschlossenem Gehörgang sich zeigte, daß bei einer Druckerhöhung die Lautstärke des Luftleitungstones um ebensoviel abnimmt, wie die des Knochenleitungstones, so ist anzunehmen, daß bei offenem Gehörgang die Kompressionen im Gehörgang nur mehr sehr wenig zur Geltung kommen können. Da auch die durch die Kompression des Mittelohres bedingte Einwärtsbewegung des Steigbügels von der gleichen Größenordnung ist, wie die gleichzeitig durch die Bogengänge in den oberen Schneckenkanal eingepreßte Flüssigkeitsmenge, so ist zu erwarten, daß durch die Fixation der Steigbügelplatte die Lautstärke des Knochenleitungstones weniger geändert wird als die des Luftleitungstones, da die von den Bogengängen her einströmende Flüssigkeitsmenge sich dabei nicht ändert.

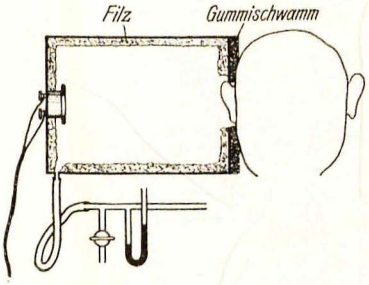

Fig. 20. Herstellung von Druckänderungen bei offenem Gehörgang

Um Druckänderungen bei offenem Gehörgang vornehmen zu können, dient die Anordnung in Fig. 20, bei der das Ohr vollkommen frei in einem Druckraum liegt, dessen Wandung mit einem schalldämpfenden Stoff ausgefüttert ist, womit die eventuell von dem Kopfe auf den Druckraum übertragenen und abgestrahlten Schwingungen absorbiert werden. Eine mit Flüssigkeit abgedichtete Gummi-

schwammzwischenlage sorgt dafür, daß der Kopf sich luftdicht anschließen läßt.

Es konnte nun bei sämtlichen Beobachtern bestätigt werden, daß die Lautstärkenänderung für den Luftleitungston bedeutend größer ist. So ergab sich z. B. für den Luftleitungston eine 10fache Lautstärkenabnahme, während für den gleichen Druck beim Knochenleitungston sich bloß eine Änderung um das 3fache zeigte.

Bei einigen Beobachtern gelang es sogar, durch geeignete Wahl der Druckstelle des Schwingungskörpers den bei offenem Gehörgang im Mittelohr entstehenden Ton so weit zu unterdrücken, daß bei der Druckzunahme von 20 cm Wassersäule eine 3fache Lautstärkenerhöhung erhalten wurde. Es ist wichtig, daß auch am gesunden Ohre die Erfahrung der Ärzte bestätigt werden konnte, wonach eine Verminderung der Beweglichkeit des Steigbügels eine Lautstärkenzunahme beim Knochenleitungston bewirken kann.

Auch zeigte es sich oft, daß bei Frequenzen über 3000 Hz, wo ein Verschluß des Gehörganges oft keine Lautstärkenerhöhung mehr ergibt, Fig. 15, also im Gehörgang keine nennenswerten Druckschwankungen auftreten, beim festeren Eindrücken des Fingers sehr deutliche Lautstärkenvergrößerungen erfolgen.

Gelegentlich wurde auch bei einem auf den Unterkiefer aufgesetzten Schwingungskörper bei einer Druckerhöhung mit der Druckkammer eine Lautstärkenerhöhung erhalten, während beim seitlichen Hinausschieben des Unterkiefers, wodurch mehr die Teile des Gehörganges komprimiert werden, sich eine Lautstärkenabnahme ergab.

Wir können auch das Verhältnis der Volumenverschiebung, wie sie durch die Kompression in den Bogengängen und dem oberen Schneckenkanal, in der Fig. 19c schraffiert dargestellt, zu der Volumenverschiebung durch die Steigbügelbewegungen, bei offenem Gehörgang, berechnen.

Bezeichnen wir nämlich die Volumenverminderung durch die Kompression der Bogengänge, vermehrt um die Volumenverminderung des oberen Schneckenkanals mit V, die gleichphasige Volumenverminderung durch die Verschiebung des Steigbügels mit S, so wird nach der Fig. 19c die Lautstärke L des Knochenleitungstones durch die Durchbiegung der Basilamembran, d. h. $S + V$ bestimmt. Bedeutet K einen Proportionalitätsfaktor, so ist

$$L = K\,(S + V). \tag{7}$$

Im Falle der Fig. 19a wäre S negativ und gleich groß der Volumenänderung im oberen Schneckenkanal, so daß $S + V = 0$ wird.

Tritt nun eine Druckerhöhung im äußeren Gehörgang, ein so wird die Beweglichkeit des Steigbügels um das n-fache vermindert, während die Lautstärke sich um das N-fache verändert. Werden die für die Druckerhöhungen gültigen Werte gestrichelt, so ergibt sich

$$S' = n\,S; \quad L' = N\,L = N\,K\,(S + V) = K\,(n\,S + V). \tag{8}$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich für das Verhältnis der beiden Volumenänderungen

$$\frac{V}{S} = \frac{N - n}{1 - N}. \tag{9}$$

Die bei der Druckänderung eintretende Lautstärkenänderung N ist leicht zu bestimmen, während die Verminderung der Steigbügelbeweglichkeit n dadurch erhalten wird, daß man die Lautstärkenabnahme eines Luftleitungstones gleicher Lautstärke für die gleiche Druckerhöhung ermittelt. Meist ergibt sich $n = 0{,}3$ und $N = 0{,}7$. Das Volumenverhältnis wird damit zu $\frac{V}{S} = 1{,}3$. Daß trotz der Festigkeit des Felsenbeines die Kompression der Schnecke relativ zu den Volumenänderungen des Steigbügels einen so großen Wert erreicht, ist teils der Kleinheit der Steigbügelplatte zuzuschreiben, die selbst bei großen Verschiebungen nur kleine Volumenänderungen ergibt und außerdem, daß wahrscheinlich auch durch die Blutgefäße Flüssigkeit in die Schnecke eingepreßt wird.

Doch ist dieses Verhältnis je nach der Stellung des Unterkiefers sehr verschieden.

Gelingt es beim offenen Gehörgang, durch geeignete Wahl des Druckpunktes des Schwingungskörpers die Kompression im Mittelohr so weit zu unterdrücken, daß sich die Volumenänderung der Bogengänge nicht nur über die Basilarmembran ausgleichen, sondern bereits auch den Steigbügel nach auswärts drücken, so entsteht bei einer Fixierung des Steigbügels immer eine Lautstärkenerhöhung.

Nach der üblichen Annahme wird durch die Kompression in der Schnecke der Steigbügel in jedem Falle nach außen gepreßt, so daß durch die Übertragung seiner Schwingungen auf das Trommelfell, wegen der großen Flächenvergrößerung, im Gehörgang der größte Teil der Schallstärke durch die zwangsläufigen Bewegungen des Trommelfells entsteht. Daß dies nicht zutrifft, erkennt man auch daran, daß beim Herausreißen des Steigbügels und der Gehörknöchelchen an einer Leiche die Schallstärke im abgeschlossenen Gehörgang sich nicht änderte.

VI. Zusammenfassung

Nach Untersuchung der Schwingungsform der Schädelkapsel wird die absolute Hörschwelle für die Knochenleitung gemessen, wobei es sich zeigte, daß Schwingungen von 10^{-9} cm Amplitude gelegentlich noch sehr gut wahrgenommen werden. Auch die Hörschwelle für Luftleitung wurde zur Kontrolle bestimmt, wobei die Korrektion wegen der Nachgiebigkeit des Trommelfelles genau berechnet wurde. Von dem Knochenleitungston bei geschlossenem Gehörgang wird nachgewiesen, daß er sich von einem Luftleitungston wesentlich nicht unterscheidet und durch Kompression des Gehörganges entsteht. Für den Knochenleitungston bei offenem Gehörgang wird die Bedeutung der Kompressionen in der Schnecke nachgewiesen und ihre relative Größe zu den Kompressionsschwingungen des Mittelohres bestimmt. Auch wird darauf hingewiesen, daß eine

Luftdruckerhöhung im Gehörgang bei geschlossenem Gehörgang eine Lautstärkenverminderung ergibt, die gleich derjenigen eines Luftleitungstones ist, während bei offenem Gehörgang durch die Fixierung des Steigbügels auch Lautstärkenerhöhungen erhalten werden können.

Die Versuchskosten wurden zum Teil aus dem Alfred-Denker-Preis der Gesellschaft deutscher Hals-, Nasen- und Ohrenärzte und aus den Mitteln der wissenschaftlichen Széchenyi-Gesellschaft, Budapest, bestritten, wofür ich auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank aussprechen möchte.

(Eingegangen 14. Dezember 1931)

ANNALEN DER PHYSIK

5. FOLGE, BAND 13, HEFT 2, APRIL 1932

Über die Ausstrahlung bei der Bremsung von Protonen und schnellen Elektronen[1]

Von Otto Scherzer

(Mit 3 Figuren)

Übersicht: Die Rechnungen werden im Anschluß an eine Arbeit von A. Sommerfeld[2]) durchgeführt. § 1 erbringt den Nachweis der Vollständigkeit des dort verwendeten Orthogonalsystems unter der Voraussetzung, daß die polaren Eigenfunktionen ein vollständiges System bilden. § 2 behandelt den Einfluß der Masse und des Vorzeichens der Ladung auf die Ausstrahlung. In § 3 wird die Intensität der bei der Bremsung von Protonen am nackten Kern zu erwartenden Röntgenstrahlung berechnet. § 4 enthält die Berechnung der Richtungsverteilung der gebremsten Elektronen unter Vernachlässigung der Relativitätskorrektion. Am Schlusse der Arbeit werden die Ergebnisse einer relativistischen Behandlung des Problems mitgeteilt.

§ 1. Nachweis der Vollständigkeit des den Rechnungen zugrunde liegenden Orthogonalsystems

In der Arbeit über die Beugung und Bremsung der Elektronen von A. Sommerfeld[2]), an die sich die nachfolgenden Ausführungen anschließen, wurde nicht wie üblich ein Funktionensystem benutzt, das sich aus der *Separation* der Wellengleichung ergibt, sondern ein System, dessen sämtliche Funktionen aus einer speziellen Lösung der Differentialgleichung durch *Drehen im Raume* hervorgehen. Es ist nicht von vornherein selbstverständlich, daß dieses System auch die zu fordernde Eigenschaft der Vollständigkeit besitzt; deshalb sei der Beweis hier nachgetragen.

Wir wollen dabei mit Rücksicht auf unsere späteren Rechnungen einen kleinen Umweg einschlagen und die Vollständigkeit desjenigen Systems beweisen, das man aus dem in A verwendeten, durch Übergang zum konjugiert Komplexen und räumliche Drehung um 180^0 erhält. Dieses neue System bietet für die Durchrechnung von § 4 erhebliche Vorteile, und dies ist der Grund, warum wir es schon hier einführen.

1) Gekürzte Münchener Dissertation.

2) A. Sommerfeld, Ann. d. Phys. [5] **11**. S. 257. 1931; im folgenden mit A zitiert.