

Sonderabdruck aus den  
Acta Societatis Medicorum Fennicæ "Duodecim", Ser. A, Tom. XXI, Fasc. 1.

---

---

# UNTERSUCHUNGEN ÜBER DAS RICHTUNGSHÖREN

AKADEMISCHE ABHANDLUNG

VON

ALVAR WILSKA

Republication of the original thesis in German by:

Aalto University School of Science and Technology  
Department of Signal Processing and Acoustics

by kind permission from:

Duodecim and Maija Wilska



Aus dem Physiologischen Institut der Universität Helsinki.  
Vorstand: Prof. Dr. Y. Reenpää

---

---

# UNTERSUCHUNGEN ÜBER DAS RICHTUNGSHÖREN

AKADEMISCHE ABHANDLUNG

VON

ALVAR WILSKA

*Wird mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität Helsinki am 27. Mai 1938 um 12 Uhr im  
hist.-philologischen Auditorium zur öffentlichen  
Verteidigung vorgelegt.*

HELSINKI 1938

HELSINKI 1938  
DRUCKEREI-A.G. DER FINNISCHEN LITERATURGESELLSCHAFT

## Vorwort.

Diese Arbeit ist zum grössten Teil im Physiologischen Institut der Universität Helsinki ausgeführt worden. Es ist mir ein herzliches Bedürfnis, dem Vorstand des Institutes, Herrn Prof. Dr. Y. REENPÄÄ, der meine Arbeit mit nie erlahmendem Interesse verfolgt und sie durch sein wohlwollendes Entgegenkommen in jeder Weise gefördert hat, meinen aufrichtigen, tiefgefühlten Dank auszudrücken. Es ist sein Verdienst, dass mir die neuesten Hilfsmittel der Wissenschaft zur Verfügung gestanden haben; sein grosszügiges Eingehen auf alle meine Pläne hat mir meine Aufgabe in hohem Masse erleichtert.

Dem Konsistorium der Universität Helsinki danke ich verbindlichst für die pekuniäre Unterstützung, welche die Anschaffung mancher für die Durchführung meiner Arbeit wichtigen Apparate ermöglicht hat.

Auch dem Generaldirektor des Finnischen Rundfunks, Herrn Mag. phil. J. V. VAKIO, möchte ich für die freundliche Erlaubnis, meine vorbereitenden Untersuchungen mit den technischen Hilfsmitteln des Rundfunks auszuführen, an dieser Stelle herzlich danken. Ebenso danke ich allen meinen Gehilfen, Versuchspersonen, sowie allen anderen Personen, die meine Arbeit in irgendeiner Weise unterstützt haben.



## Inhaltsverzeichnis.

<i>Historisch-Kritisches</i> .....	7
<i>Methodisch-Technisches</i> .....	17
<i>Untersuchungen der bei dem binauralen Hören wirksamen äusseren Faktoren</i> .....	21
Untersuchungen der Intensitätsverhältnisse mittels der Hörschwellenversuche .....	21
Phantomversuche zur Untersuchung der Intensitäts- und der Zeitunterschiede beim Richtungshören .....	27
Die Bedeutung der Geräusche für das Richtungshören im Lichte der obigen Ergebnisse .....	37
<i>Untersuchungen über die Richtungshörschärfe</i> .....	40
Allgemeines .....	40
Bestimmungen der Richtungshörschwellen mittels Knackgeräuschen ..	43
Versuche mit einseitigem Ohrverschluss .....	50
Über den Einfluss der »Knackschärfe« .....	51
Über den Einfluss der Ein- und Ausschwingzeit .....	52
Richtungshörversuche mit Tongemischen .....	55
Richtungshörversuche mit Dauergeäuschen .....	56
Richtungshörversuche mit Dauertönen .....	57
Versuche über die Bedeutung der Phasenunterschiede beim Richtungshören .....	58
Versuche über den Raumeindruck, über die Lokalisationsgenauigkeit sowie über die Bedeutung der Zeit- und Intensitätsunterschiede bei binaural-elektrischer Schallübertragung .....	60
Experimentelle Untersuchungen über die Eigenschaften unseres Hör-raumes .....	66
<i>Erwägungen über den Erregungsverlauf des Richtungshörreizes in den Gehörbahnen</i> .....	74
<i>Schlussbemerkungen</i> .....	78
<i>Zusammenfassung</i> .....	82
<i>Literaturverzeichnis</i> .....	85



## Historisch — Kritisches.

Die meisten Autoren sind darüber einig, dass für das Zustandekommen der Schallrichtungsempfindung irgendwelche Verschiedenheiten zwischen den Erregungen der beiden Ohren vorhanden sein müssen. Von welcher Art die Verschiedenheiten sind, die als Ursache des Richtungshörens angesehen werden müssen, ist aber eine viel umstrittene Frage gewesen. Das Richtungshören hat man hauptsächlich durch drei Theorien zu erklären versucht, nämlich durch die Intensitätstheorie, die Phasentheorie und die Zeittheorie.

*Die Intensitätstheorie:* Das eine, der Schallquelle zugewandte Ohr ist der Schallstrahlung mehr ausgesetzt als das andere, abgewandte Ohr. Der dadurch entstehende Unterschied der Erregungsstärken beider Ohren gibt uns eine Richtungsempfindung.

*Die Phasentheorie:* Wegen des Weglängenunterschiedes empfängt das zugewandte Ohr die Schallwelle in einer anderen Phase als das abgewandte; dieser Phasenunterschied ist die Voraussetzung für die Richtungsempfindung.

*Die Zeittheorie:* Das zugewandte Ohr empfängt den Schall früher als das abgewandte; dieser Zeitunterschied bedingt die Richtungsempfindung.

Wir wollen zunächst die *Intensitätstheorie* etwas eingehender betrachten. Angenommen, die Schallquelle liegt genau in der Medianebene. Dann ist die Strahlung der Schallenergie in bezug auf beide Ohren gleich stark, und wir lokalisieren den Schall demgemäss in der Mitte. Je mehr sich die Schallquelle nach der Seite hin bewegt, desto grösser wird der Intensitätsunterschied zwischen den Erregungen des rechten und des linken Ohres, was eine Seitenlokalisierung des Schalles zur Folge hat. Dieser Intensitätsunterschied wird nicht nur durch die verschiedene Entfernung der Ohren von der Schallquelle verursacht, sondern auch dadurch, dass das zugewandte Ohr für den Empfang des Schalles viel günstiger gelegen ist als das abgewandte Ohr. Bekanntlich bilden alle auf dem Wege der Schallstrahlung befindlichen Körper einen »Schallschatten«, der um so deutlicher hervortritt, je höher die Frequenz des Tones ist. Nach den

Untersuchungen von TRÖGER (1930) stellt der Kopf für die Schallaufnahme von 300 Hz aufwärts mehr und mehr eine Abschirmung dar, und schon von 2 000 Hz aufwärts ist die Aufnahme in der Richtung senkrecht zur Ohrmuschel viel stärker als in anderen Richtungen.

Wenn auch die Intensitätstheorie, wie wir später sehen werden, nicht als Grundlage des Richtungshörens gelten kann, hat sie doch mehrere Anhänger gehabt [GATSCHER (1924), KREIDL und GATSCHER (1920, 1923), BRUNZLOW (1925)].

Gegen die Phasentheorie führen KREIDL und GATSCHER (1920) an, dass bei der Lokalisation von Geräuschen nur der Unterschied der Schallintensität in den beiden Ohren ausgewertet werden kann, weil Phasendifferenzen bei Geräuschen nicht vorkommen können. Gegen die Zeittheorie erheben die genannten Autoren (1923) den Einwand, dass zwei Schalleindrücke, die je ein Ohr nacheinander treffen, erst dann als getrennt erkannt werden, wenn das Intervall für Geräusche 0.03", für Töne 0.0175" beträgt. Auf Grund dieser Beobachtung wird die Zeittheorie, die weit kleinere Zeitunterschiede zur Erklärung des Richtungshörens heranzieht, als unhaltbar abgelehnt.

Meines Erachtens bilden die letztgenannten Versuchsergebnisse keinen Beweis gegen die Zeittheorie. Bei der Schallokalisation handelt es sich gar nicht um ein Getrennt-Erkennen, sondern ist die Richtungswahrnehmung eine durchaus einheitliche. Werden die zwischen den beiden Ohren wirksamen Zeitunterschiede künstlich verlängert, bis wir im obigen Sinne »getrennt« hören, so sind die Verhältnisse für das Richtungshören schon ganz unnatürlich.

BRUNZLOW (1925) hat seine vorbereitenden Versuche mit Stimmgabeln und Teleskopröhren angestellt. Vpn., bei denen die Hörschärfe rechts und links verschieden war, empfanden bei gleichen Weglängen das subjektive Hörbild auf Seiten des besser hörenden Ohres verlagert. Wurde der Schenkel des Rohres auf dieser Seite verlängert, bis das Hörbild genau median lag, so konnte man hierdurch ein Mass für das gegenseitige Verhältnis der Hörfähigkeiten beider Ohren erhalten. BRUNZLOW erklärt dies Phänomen dahin, dass die Schenkelverlängerung eine Abschwächung der dem Ohre zugeleiteten Schallstärke bedingt, und hält es damit für erwiesen, dass das Phänomen der Wanderung des subjektiven Hörfeldes sich durch Veränderung der Intensität hervorrufen lässt. Auf Grund seiner Feststellungen trug er kein Bedenken, für die weiteren Unter-

suchungen von der Theorie des binauralen Zeitunterschieds ganz abzusehen.

Weitere Bestimmungen der Richtungsschwelle in der Horizontalebene führte BRUNZLOW mit dem Fallphonometer aus. Eine besonders kleine Richtungsschwelle wurde an zwei Stellen gefunden: gerade vorne und hinten-seitlich. Es sind die Punkte, an denen hinten durch die Ohrmuschel alle von hinten, vorn durch den Vorderkopf alle von der Gegenseite kommenden Schallwellen abgeschirmt werden. Hier vollzog sich etwas Analoges wie bei seinen früher gemachten Hörtrichterversuchen, wenn die Schallquelle ausserhalb des Trichteröffnungswinkels rückte. Nach BRUNZLOW ist die monotische Schallokalisation das Element unserer räumlichen Schallvorstellung und besteht in der Fähigkeit, den Stellungswechsel zu erkennen, den eine Schallquelle unserem Ohr gegenüber erfährt. Die Erkenntnis des Stellungswechsels wird ermöglicht durch die Veränderungen in der Qualität des Schalleindruckes, die wir um so besser wahrnehmen, je feiner unser klanganalytisches Vermögen ist. Diese Änderung der Schallqualität beruht letzten Endes auf dem wechselnden Gedämpftwerden einer Schallmasse, je nachdem, ob die Ohrmuschel der Schallquelle zu- oder von ihr abgewandt ist.

Nach BRUNZLOW sind die »zentralen« Hörbereiche des rechten und linken Ohres getrennt, greifen aber vorn ineinander über, ähnlich wie die Gesichtsfelder bei Tieren, deren Augen seitlich am Kopfe stehen. Es gibt nach seiner Ansicht nur einen binauralen Hörbereich, der durchaus den Charakter des »peripheren« (gedämpften) trägt; das ist der hintere. Die Schalleindrücke, die irgendwoher von der Seite kommen, sind nur für das eine (zugewandte) Ohr zentral, für das andere (abgewandte) peripher, müssen somit nach Intensität und Qualität wesentlich verschieden empfunden werden, und ihr gegenseitiges Verhältnis wird variieren, je nachdem, ob der Schall rein von der Seite, direkt von vorn oder aus einer Zwischenrichtung kommt. Dieser qualitative Wechsel ist vielleicht das Ausschlaggebende bei dem binauralen Schalleindruck, dem gegenüber der Zeit- und der Phasenunterschied stark zurücktreten. Dass auch diese Unterschiede das Klangbild beeinflussen, wird allerdings vom Autor nicht bestritten.

Die mit Teleskopröhren angestellten vorbereitenden Versuche, auf Grund welcher BRUNZLOW von der Bedeutung des binauralen Zeitunterschiedes ganz absehen zu dürfen glaubt, sind meines Erachtens nicht genügend beweiskräftig. Man muss bedenken, dass

die Fortpflanzung des Schalles in solchen Röhren infolge der Reflexionen und der Resonanz der Luftsäulen anders als in freier Luft erfolgt. Ferner entstehen ja beim Verlängern des einen Rohres auch ein Phasen- und ein Zeitunterschied.

Durch Untersuchungen von KLEMM (1920), BÉKÉSY (1930) sowie nach SHAXBY und GAGE (1936) ist bekannt geworden, dass, wenn das subjektive Hörbild infolge eines Stärkeunterschieds auf der Seite des stärkeren Schalles liegt, sich dieser Einfluss durch einen entgegengesetzten Zeitunterschied ausgleichen lässt, so dass das Hörfeld wieder in die Mitte rückt. Nach HALVERSON (1922) kann man durch einen Stärkeunterschied bei geübten Personen eine Abweichung des Schallbildes von  $8^\circ$ , bei anderen von höchstens  $40^\circ$ , nie aber von  $90^\circ$  erzielen, und nach seinen Versuchen lässt sich durch Intensitätsunterschiede niemals eine echte Wanderung des subjektiven Schallbildes hervorrufen. In den Versuchen von STEWART (1920) wurde das Intensitätsverhältnis an beiden Ohren variiert und die Phasendifferenz konstant gehalten. War die Phasendifferenz = 0, so verschob sich das Schallbild aus der Mediane nach der Seite des stärker erregten Ohres hin. Doch entsprach der Betrag dieser Verschiebung nicht den berechneten Werten, sondern belief sich z.B. statt auf  $60^\circ$  nur auf  $9\text{--}14^\circ$  (bei Tönen von 512 und 1024 Hz). Neben diesem bewegten Schallbild wurde zugleich ein ruhendes in der der Phasendifferenz entsprechenden Richtung (für die Phasendifferenz 0 in der Mediane) wahrgenommen. Bei Änderung der Phasendifferenz und gleichbleibender Intensität stimmten die beobachteten Richtungen mit den berechneten Werten gut überein; von 1200—1500 Hz aufwärts verschwand aber die Wirkung der Phasendifferenz, und das Schallbild blieb in der Mediane.

Nach Untersuchungen von HECHT (1922), TRIMBLE (1929) sowie nach STEVENS und NEWMAN (1934) sind die Intensitätsunterschiede bei hohen, die Phasendifferenzen bei niederen Tönen für das Richtungshören massgebend.

Während die Erklärung der Lokalisationsfähigkeit bei niederen Tönen durch die Intensitätsunterschiede keine befriedigende ist, wird sie durch die Phasentheorie bedeutend leichter. Wenn eine Tonwelle das eine Ohr früher als das andere erreicht, ist auch die Phase in jenem Ohr früher als in diesem, und diese Phasendifferenz würde uns der Theorie gemäss eine Richtungsempfindung ermitteln. Die Phasendifferenz ist  $P = 0$ , wenn die Schallquelle in der Mediane-

bene des Kopfes steht; sie wächst mit Verschiebung der Schallquelle nach der Seite hin, und erreicht ihr Maximum, wenn die Schallquelle in der Ohrenachse liegt. Da der Schall um den Kopf herumwandern muss, soll man statt des geraden Ohrenabstandes die von v. HORNBOSTEL und WERTHEIMER (1920) empirisch bestimmte Konstante  $k = 21$  cm als Grundlage für die Berechnungen des Phasenunterschiedes annehmen.

Der Phasenunterschied  $P$  ist desto grösser, je höher die Frequenz, also je kleiner die Wellenlänge  $\lambda$  ist, bis  $\lambda/4 = k = 21$  cm wird, wenn die Schallquelle sich in der Ohrenachse befindet. Die dieser Wellenlänge entsprechende Frequenz liegt bei 400 Hz. Bei noch höheren Frequenzen wird  $P$  immer kleiner, und bei der Frequenz 800 Hz, wo  $\lambda/2 = k$ , »neutralisieren« die Wellenphasen einander. Bei weiterer Steigerung der Frequenz wächst der Phasenunterschied und erreicht sein zweites Maximum bei  $3\lambda/4 = k$  (Frequenz 1 200 Hz), wonach er sich wieder vermindert, bis er bei  $\lambda = k$  (Frequenz 1 600 Hz) abermals 0 wird.

Lässt man von zwei Tönen, die sehr wenig gegeneinander verstimmt sind, *jeden ausschliesslich auf ein Ohr wirken*, so wird eine kontinuierliche Änderung des Phasenunterschieds bei gleichbleibender Stärke der Reize erzielt, und man würde einen einzigen Ton im Kreise herumlaufen hören (»Drehton«).<sup>1</sup> Da diese Drehtöne eine geschlossene Kreisbahn zu beschreiben schienen, wurden die scheinbaren Richtungswinkel  $\varphi$  den Phasenunterschieden  $P$  so zugeordnet [FRY (1922)], wie es Abb. 1 zeigt ( $0^\circ =$  Mediane,  $90^\circ =$  Ohrenachse).

Wäre nun die scheinbare Richtung in der aus Abb. 1 ersichtlichen Weise von dem Phasenunterschied abhängig, so würde bei kontinuierlicher Änderung der Frequenz einer stillstehenden Schallquelle das subjektive Schallbild im Kreise herumwandern. Die Untersuchungen von BOWLKER (1908), STEWART (1920 I) HALVERSON (1922), v. HORNBOSTEL (1923) haben aber gezeigt, dass dies nicht der Fall ist, sondern das subjektive Schallbild kehrt bei Phasenunterschieden zwischen  $\lambda/4$  und  $\lambda/2$  nicht zur Mediane zurück, und zur Erreichung einer Abweichung von  $90^\circ$  ist ein um so grösserer Phasenunterschied notwendig, je höher die Frequenz ist. Das Schallbild verharrt dann bei  $90^\circ$  bis zu einem Phasenunterschied von  $\lambda/2$ , wo es verschwindet. Gleichzeitig taucht auf der entgegengesetzten Seite bei  $90^\circ$  ein

<sup>1</sup> Zuerst von S. P. THOMPSON im Jahr 1878 beschrieben; zit. nach HORNBOSTEL (1922).

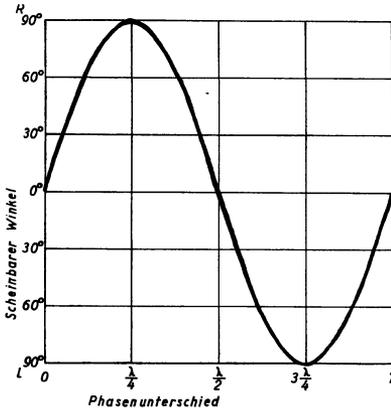


Abb. 1.

Abhängigkeit des Richtungswinkels vom Phasenunterschied nach der älteren Anschauung.

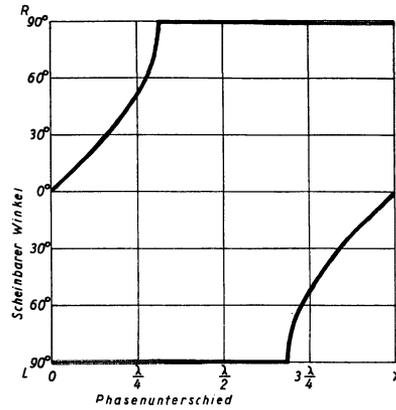


Abb. 2.

Abhängigkeit des Richtungswinkels vom Phasenunterschied nach der neueren Anschauung; Frequenz 500.

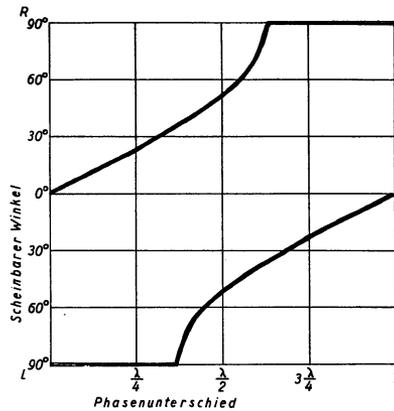


Abb. 3.

Wie in Abb. 2.; Frequenz 1000.

Schallbild auf und wandert zur Mediane, die es bei  $P = \lambda$  erreicht. In Abb. 2 ist dies veranschaulicht; die Kurve gilt für 500 Hz. Die beiden zwischen 0 und  $\lambda$  befindlichen Kurvenäste nähern sich einander mit steigender Frequenz, bis sie sich bei Frequenzen oberhalb 800 Hz übereinanderschieben, wie aus Abb. 3 (Frequenz 1000 Hz) ersichtlich ist. Wird die Frequenz noch bis 1600 Hz erhöht, so erstrecken sich die beiden Kurven über das ganze Gebiet von 0 bis  $\lambda$ . Zwischen den Frequenzen 800 und 1600 Hz soll man

zwei Schallbilder gleichzeitig empfinden können, die sich bei 800 Hz auf den entgegengesetzten Seiten in der Ohrenachse befinden, aber bei steigender Frequenz einen immer kleineren Winkel bilden, bis sie bei 1 600 Hz in der Mediane zusammenfallen.

Nach v. HORNBOSTEL (1926) werden folgende Beziehungen zwischen scheinbarer Richtung und Phasenunterschied aufgestellt:

1. Die Richtung liegt auf Seiten der vorlaufenden Phase.

2. Der Winkel zur Mediane ( $\varphi$ ) wächst mit zunehmendem Phasenunterschied ( $P$ ), und zwar bei allen Frequenzen in derselben Weise: die Kurve, die diese Beziehung darstellt, ist eine Sinuskurve ( $P = k \sin \varphi$ ).

3. Der einem bestimmten Winkel zugeordnete Phasenunterschied wächst proportional der Frequenz. Z.B. wird die für 1 000 Hz gezeichnete Kurve (Abb. 3) zur Kurve für 500 Hz (Abb. 2), wenn wir den Abszissenmassstab verdoppeln, also  $\lambda/4$  an die Stelle von  $\lambda/2$  setzen usw. und den unteren Kurvenast parallel zu sich selbst nach rechts um die (alte) Länge  $\lambda$  verschieben. Das heisst aber nichts anderes als: nicht nur die Form, sondern auch die absolute Grösse der beiden Kurvenäste bleibt bei allen Frequenzen dieselbe, wenn wir als Massstab für die Abszissen nicht Bruchteile von Wellenlängen, sondern ein absolutes Mass (cm) einführen. Tun wir das, dann zeigt sich folgendes:

4. Dem Winkel  $90^\circ$  entspricht eine Abszisse von 21 cm (im oberen Kurvenast; im unteren  $\lambda - 21$  cm).

Die Bedeutung der Phasentheorie beschränkt sich natürlich auf reine Töne. Im täglichen Leben sind die reinen Töne eine Seltenheit; als Gegenstände unserer Hörwelt sind die Geräusche viel häufiger als die Klänge. Beim Richtungshören der Geräusche kann neben dem Intensitätsunterschied nur noch die *zeitliche Verschiebung* der Erregungen an den Ohren als Ursache in Frage kommen. Nach v. HORNBOSTEL und WERTHEIMER (1920) bleiben die oben für Töne aufgestellten Sätze auch für Geräusche gültig, wenn man statt des Phasenunterschiedes  $P$  den Zeitunterschied  $\Delta t$  einsetzt. Nach ihnen ist damit an die Stelle der Phasentheorie die *Z e i t t h e o r i e*<sup>1</sup> getreten. Der scheinbare Winkel folgt der Beziehung:  $\sin \varphi = \frac{\Delta s}{k} = \frac{34000 \cdot \Delta t}{k}$ ; ( $\Delta s$  = der Weglängenunterschied in cm,  $k = 21$  cm,  $\Delta t$  = der Zeitunterschied in sek., 34 000 = die Schallgeschwindigkeit in cm bei Zimmertemperatur).

<sup>1</sup> Zuerst MALLOCK 1907, dann v. KRIES 1913. Zit. nach v. HORNBOSTEL (1922).

Nach den Untersuchungen von KLEMM (1920) ist die binaurale Zeitschwelle kleiner als die gewöhnliche (= nicht getrenntohrige). Er hat seine Versuche mit einem Helmholtz-Pendel für die Erzeugung von elektrischen Stromstössen und zwei Telephonen zum Abhören derselben ausgeführt. Die gewöhnliche Zeitschwelle (wo zwei Schallreize noch gesondert gehört werden) beträgt etwa  $2\sigma$ . Bei binauraler Zuleitung bleibt die subjektive Wahrnehmung von 2 Schallrichtungen noch bestehen, wenn der zeitliche Unterschied der beiden Schallreize nicht mehr wahrnehmbar ist. Wird der Zeitunterschied auf  $1.8 - 0.13\sigma$  herabgesetzt, so erzielt man bei den meisten Versuchspersonen die Verschmelzung zu einer einheitlichen Schallwahrnehmung, und die Lokalisation dieser Schallwahrnehmung nach der Seite des zuerst gehörten Schalles tritt bis zu einem Zeitunterschied von  $0.61\sigma$ , bisweilen sogar bis zu  $0.002\sigma$  auf.

Nach den Untersuchungen von ENGELMANN (1928) über die *Schallokalisierung bei Tieren* wird man annehmen müssen, dass der Wert von  $k$  mit der Grösse des Ohrenabstandes variiert. Diese äusserst kunstvoll angeordneten Versuche mit Haustieren (Hund, Katze, Huhn) zeigen, dass die Tiere trotz ihres kleinen Ohrenabstandes (Hund 9—13, Katze 6.5—7, Huhn 3, Kücken 1.5 cm) viel kleinere Richtungsunterschiede unterscheiden können als der Mensch. Bemerkenswert ist auch, dass der Hund die Schallentfernungen nicht erfasst, während die Katze ein sehr feines Unterscheidungsvermögen für dieselben besitzen soll.

Man könnte sich vorstellen, dass für das Richtungshören ein hochentwickeltes Gehirn nötig wäre. Gewisse Erfahrungen aus dem Leben der Insekten zeigen aber, dass auch sie trotz ihres primitiven Nervensystems sich im Raum nach dem Schall zu orientieren vermögen. REGEN (1924) hat gefunden, dass sich das Heuschreckenweibchen, wenn es vom Geschlechtstrieb erfasst ist, aus mindestens 10 m Entfernung gerichtet auf das zirpende Männchen zu bewegt. Sobald das Männchen aufhört zu zirpen, wird auch die Bewegung des Weibchens desorientiert. Nach Zerstörung der Tympanalorgane findet das Weibchen sein Ziel nicht mehr. Bei einseitig operierten Weibchen ist die Bewegung nicht mehr gerichtet, und die Bewegung fordert eine viel längere Zeit als sonst. Dass wirklich dieser Stridulationsschall und nicht etwa der Geruchsinn die Geschlechter zusammenlockt, ist von REGEN einwandfrei nachgewiesen. Er liess das Männchen vor einem Mikrophon zirpen, und brachte das Telephon in ein anderes Zimmer, wo sich das Weibchen befand. Wurde das

Mikrofon eingeschaltet, dann schritt das Weibchen sogleich auf den telephonisch wiedergegebenen Schall zu; wurde die Verbindung unterbrochen, so wanderte es vom Telephon weg.

Seit der Entstehung des Luftkrieges ist dem Studium des Richtungshörens viel Arbeit gewidmet worden. Die Entdeckung der feindlichen Flugzeuge in der Nacht, bei dichter Bewölkung und bei Nebel ist die Voraussetzung einer erfolgreichen Abwehr. Unter solchen Verhältnissen ist das Auge machtlos. Mit freien Ohren ist die genaue Feststellung der Schallrichtung schwieriger als mit zu diesem Zweck konstruierten *Horchgeräten*. Diese zerfallen in bezug auf die Art der Richtungsbestimmung in zwei Gruppen. Die eine Gruppe gründet sich auf das Maximalprinzip, d.h. die akustische Achse wird in der Richtung des maximalen Flugzeuggeräusches gesucht. Die andere Gruppe, zu welcher die meisten Horchapparate gehören, beruht auf dem Binauralprinzip. Der wesentlichste Unterschied gegenüber dem gewöhnlichen Hören bildet hierbei die künstliche Verlängerung der Ohrenbasis ( $k$ ) durch Röhren und Trichter, die zugleich den Schall verstärken. Bringt man die Empfängertrichter in den Abstand  $b$ , so wird der scheinbare Richtungswinkel  $\varphi$  gegenüber dem wahren  $\alpha$  vergrößert, und man soll auf diese Weise noch Richtungen unterscheiden können, die für die unbewaffneten Ohren zusammenfallen. Der wahre Winkel ergibt sich aus dem scheinbaren durch die Beziehung ( $\Delta s =$ )  $b \sin \alpha = k \sin \varphi$  [HORNBOSTEL (1926)]. Die meisten Horchgeräte besitzen zwei Basen, je eine zur Bestimmung des Seiten- und des Höhenwinkels.

Nach Untersuchungen von AGGAZZOTTI (1921), LACHMUND (1921) und PEREKALIN (1930) ist die Lokalisation langdauernder Töne viel schwieriger als diejenige periodisch unterbrochener Töne. Beginn und Ende des Schalleindrucks scheinen für die Lokalisation entscheidend zu sein.

Hinsichtlich des Einflusses der Vestibularisreizung wird von RAUCH (1922) angegeben, dass mit dem Drehschwindel entweder eine vollkommene Desorientierung eintritt, oder dass der Schall im Sinne der Drehrichtung, selten gegen dieselbe oder sogar richtig lokalisiert wird.

Zu ähnlichen Ergebnissen sind ALLERS und BÉNESI (1922) gekommen. GOLDSTEIN und ROSENTHAL-VEIT (1926) haben gefunden, dass ein median lokalisiertes Schallbild, wenn der Beobachter die Augen seitwärts dreht, nach der entgegengesetzten Seite verschoben wird; hält er seine Augen dagegen auf die Mittenrichtung

fixiert und dreht den Kopf, so weicht das Schallbild im Sinne der Drehrichtung ab. Die Funktion des Labyrinthes spielt, wie u.a. TULLIO (1926) hervorhebt, eine grosse Rolle beim Richtungshören sowie überhaupt bei der Erkenntnis eines dreidimensionalen Raumes.

Die hier in diesem Kapitel referierten Untersuchungen bilden den Grund für die Physiologie des Richtungshörens. Später im Zusammenhang mit meinen Versuchen werde ich die Ergebnisse mancher, auch hier unerwähnter Autoren eingehender behandeln, da es dem Leser leichter fällt, sie nach den hierbei klarer werdenden technischen usw. Vorkenntnissen zu verstehen.

## Methodisch — Technisches.

Da ich bei meinen Versuchen so viele technische Hilfsmittel benutzt habe, dass deren Beschreibung im Zusammenhang mit den Versuchen selbst sich schwierig gestalten würde, ist es vielleicht am Platze, einige der am meisten angewandten Geräte hier kurz zu schildern. Auf Grund dieser vorbereitenden Beschreibung der wichtigsten Apparaturen, die mir zur Verfügung gestanden haben, werden die später bei den Versuchen zu beschreibenden verschiedenen Kombinationen der Geräte dem Leser leichter verständlich.

Nach den vorbereitenden Versuchen, von denen der grösste Teil im Hause des Finnischen Rundfunks (Suomen Yleisradio) angestellt wurde, trat die Notwendigkeit ein, einen akustischen Versuchszimmers immer deutlicher zutage. Auf dem Boden des Physiologischen Instituts gab es ein zu diesem Zweck geeignetes Zimmer von der Grösse  $7 \times 3.5 \times 3$  m. Um diesen Raum möglichst nachhallfrei zu gestalten, wurden die Wände und die Decke mit Wellpappe ausgekleidet. Die Wellpappe wurde so befestigt, dass sie etwa 0.5 m breite und 0.3 m tiefe Falten bildete, wodurch zwischen der Wand und der Pappe vertikale Hohlräume entstanden, die mit Holzwolle gefüllt wurden. Dann wurden die Wände und die Decke mit gefaltetem, dicken Wollzeug überzogen und der Fussboden mit einem doppelten, dicken Teppich belegt.

In der Nähe dieses Zimmers, das ich als *Aufnahmeraum* bezeichne, standen mir zwei weitere Zimmer zur Verfügung, von denen das eine *Generatorzimmer* und das andere *Analysierzimmer* heissen möge. In dem ersteren befanden sich zwei *Wechselstromgeneratoren*, der eine nach GILDEMEISTER und KOCH gebaut und der andere gleichfalls mit einer Gegentaktschwingschaltung, aber mit kapazitiver Koppelung versehen. Beide waren imstande, praktisch sinusförmige Wechselströme von 30 Hz aufwärts zu liefern. Zu weiterer Reinigung der Sinusströme von Oberwellen wurde ein von mir konstruiertes Oktavensieb von 7 Oktaven verwendet, das aus dreigliederigen Siebketten zusammengesetzt war. Es war nur in Ausnahmefällen nötig, dies Oktavensieb in Anspruch zu nehmen, da die Sinusreinheit der Wechselströme, wie schon gesagt, gut war.

Mittels Lautsprecher und Kopfhörer wurden die durch die Generatoren erzeugten Wechselströme in entsprechende Töne umgewandelt. Die bei einigen Versuchen angewandten, harmonische Obertöne enthaltenden Klänge wurden durch Verengerung der Koppelung, Serienschaltung der Kapazitäten im Lautsprecherkreis usw. zustandegebracht. Schwebungen, Tongemische usw. wurden durch die gleichzeitige Anwendung beider Generatoren in üblicher Weise erzeugt. Eine

\*\*\* Nach den vorbereitenden Versuchen, von denen der grösste Teil im Hause des Finnischen Rundfunks (Suomen Yleisradio) angestellt wurde, trat die Notwendigkeit einen akustischen Versuchszimmers immer deutlicher zutage. Auf dem Boden des Physiologischen Instituts ...



war fertig. In gleicher Weise wurde das Negativ der rechten Kopfseite hergestellt. Nach dem Trocknen wurden die Negative mit Vaseline bestrichen und alsbald mit der Herstellung der positiven »Kopfschale« begonnen. Hierzu wurden etwa  $30 \times 30$  cm grosse Gazestücke in Gipsbrei eingetaucht und Schicht auf Schicht an die Innenfläche der Negative gedrückt, bis die Dicke der Gips-Gazeschicht etwa 1 cm betrug. Nach dem Hartwerden wurde das so entstandene Positiv aus der Matrice entfernt und erwies sich, nachdem die überflüssigen Ränder ausgeschnitten waren, als eine sehr gute Nachbildung der ursprünglichen Kopfhälfte. Die fertigen Hälften wurden dann mittels eines an den Hinterhauptträndern befestigten Scharniers wie die Schalen einer Muschel beweglich miteinander verbunden. Eine der Hautkonsistenz einigermaßen entsprechende Deckschicht wurde durch einen Belag aus geschmolzenem Gelatinegummi erzielt. Der negative Abguss der Gehörgänge wurde mit Hilfe von Wood-Metall und derjenige der Ohrmuscheln mit Hilfe von Gipsbrei bewerkstelligt. Nachdem dieselben miteinander verbunden waren, wurden die entsprechenden positiven Abgüsse der Ohrregionen aus Gelatinegummi angefertigt. Vom Kopfphantom wurden die aus Gips bestehenden Ohrregionen entfernt und durch diese ihrer Konsistenz nach den natürlichen sehr nahestehenden »Ohren« ersetzt. Die nach der Innenseite der Kopfhälfte hineinragenden, die Gehörgänge umgebenden Gummimassen wurden so ausgeschnitten, dass die Membranen beim Aufsetzen der beschriebenen Mikrophone ohne weiteres unter den natürlichen Verhältnissen entsprechenden Winkeln an die Stelle der Trommelfelle zu liegen kamen. Durch die Mikrophonmembran wurde der Gehörgang luftdicht abgeschlossen. Auch war die Membran (Durchmesser 13 mm) nicht viel grösser als das Trommelfell. Gerade aus diesem Grunde waren ja die Abmessungen der Mikrophone so klein gewählt worden. Die Innenfläche des Kopfphantoms wurde mit einer 1 mm dicken Bleiplatte belegt, die als elektrischer Störschutz diente. Beide Kopfhälften enthielten einen Vorverstärker, der prinzipiell mit den früher beschriebenen Verstärkern übereinstimmte, aber aus verständlichen Gründen auf andere Weise eingebaut war. Besser als durch viele Worte wird der Bau des Phantoms durch die Abb. 4 veranschaulicht.

Die beiden widerstand-kapazitiv gekoppelten *Endverstärker* befanden sich im Analysierzimmer.

Um die Schalleinwirkungen beider »Ohren« gleichzeitig betrachten oder photographisch aufnehmen zu können, wurden bei meinen Versuchen stets zwei *Kathodenstrahloszillographen* benutzt. Es waren Cossor-Röhren, Type C. Die Stative der Oszillographen waren so gebaut, dass sich die Röhren ganz dicht aneinander bringen liessen. Dies war notwendig, um die Aufnahme auf denselben Film zu ermöglichen.

Da das Stromnetz unseres Institutes nur Gleichstrom lieferte, musste der zur Erzielung hoher Spannungen erforderliche Wechselstrom durch einen rotierenden *Doppelankerumformer* erzeugt werden. Ein *Spannungsgerät*, das den beiden Oszillographen ihre Heiz-, Anoden- und Wehneltzylinderspannungen lieferte, war nach den üblichen Prinzipien gebaut.

Einen wichtigen Teil meiner Apparatur bildete *das Kippgerät*, eine Einrichtung, mit der man bekanntlich dem Kathodenstrahl eine sich regelmässig wiederholende Ablenkung von konstanter Geschwindigkeit erteilen kann. Wurde der Strahl durch die den zu analysierenden Schallvorgängen entsprechenden

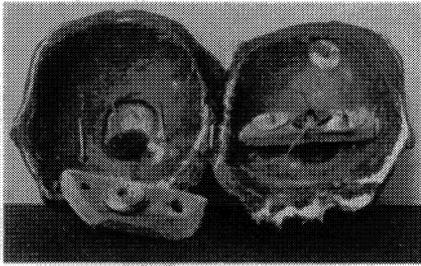


Abb. 4 a.

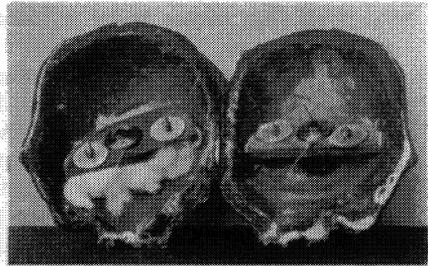


Abb. 4 b.

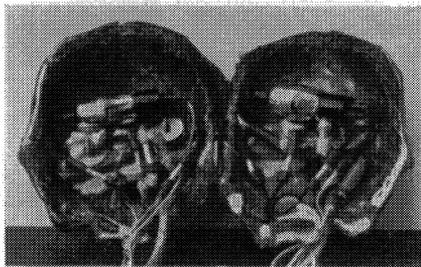


Abb. 4 c.

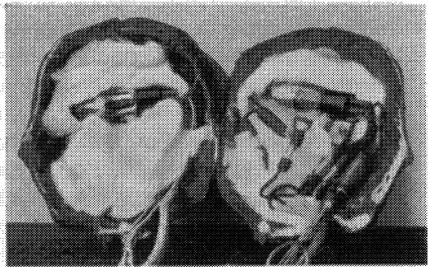


Abb. 4 d.

Abb. 4. Der Bau des Kopfphantoms nebst den Verstärkern.

Wechselspannungen in der anderen Koordinatenachse abgelenkt, so zeichnete der Kathodenstrahl ein Bild des Schallvorganges. Erfolgte das »Umkippen« des Kathodenstrahles in einer Frequenz, die einen ganzzahligen Bruchteil der zu untersuchenden Tonfrequenz darstellte, so entstand auf der fluoreszierenden Schicht der Kathodenstrahlröhre ein stehendes Bild des Tones. Für diese sogenannte Synchronisierung der Kippfrequenz wurde eine Pressler-Glimmrelais-Röhre benutzt, die eigentlich für andere Zwecke konstruiert worden ist. Die genannte Röhre erwies sich als sehr geeignet für meine Untersuchungen.

Die in der beschriebenen Weise erzeugten stehenden Schwingungsbilder wurden mit einem Zeiss-Ikon-Aufnahmekino Modell A photographisch aufgenommen. Die Frequenzzeichnung der Sinusstromgeneratoren und die Aufzeichnung der Ein- und Ausschwingvorgänge sowie der Schwebungen und Tongemische wurde mittels einer *Edelmann-Kamera* mit elektrischem Trieb auf laufenden Film bewerkstelligt.

Zwischen dem Aufnahmezimmer und dem Analysierzimmer wurde eine gegenseitige Lautsprecher-Telephonverbindung eingerichtet, wodurch die Ausführung der Versuche bedeutend erleichtert wurde.

Oben sind die wichtigsten von mir benutzten Apparate in grossen Zügen beschrieben worden. Auf manche methodische Einzelheiten werde ich später im Zusammenhang mit den Versuchsberichten näher eingehen.

## **Untersuchungen der bei dem binauralen Hören wirksamen äusseren Faktoren.**

*Untersuchungen der Intensitätsverhältnisse mittels der  
Hörschwellenversuche.*

Es ist eine physikalische Tatsache, dass sich der Schall im freien Raum geradlinig fortpflanzt. Wird in den Weg der Schallstrahlung irgendein Hindernis, z.B. ein fester Körper gebracht, so bildet sich hinter demselben ein Raum, in welchem die Schallstärke infolge der Schattenwirkung des Körpers herabgesetzt ist. Je höher die Frequenz des Tones ist, desto »tiefer« ist der Schallschatten, und umgekehrt, je niedriger die Tonfrequenz, desto geringer die Schirmwirkung. Folgender Versuch ist in dieser Hinsicht sehr lehrreich: Wenn wir z.B. mit einem Lautsprecher einen mittelstarken Ton von etwa 6 000—8 000 Hz erzeugen und das eine Ohr zuhalten, hören wir beim Drehen des Kopfes den Ton am stärksten, wenn das offene Ohr der Schallquelle zugekehrt ist. Drehen wir uns dann um 180°, so dass das offene Ohr auf der von dem Lautsprecher abgewandten Seite des Kopfes gelegen ist, so hören wir, vorausgesetzt, dass das Zimmer genügend nachhallfrei ist, den Ton sehr schwach. Benutzen wir irgendeine kleine Platte — hierzu genügt schon ein Handteller — als akustischen Spiegel, so können wir den Schall wie einen Lichtstrahl in dies abgewandte Ohr von der Seite her reflektieren. Dies gelingt um so besser, je höher die Frequenz des Tones ist. (Die Schallotungstechnik arbeitet mit hohen Frequenzen, bzw. Ultraschällen!). Werden die genannten Versuche mit einem Ton von 200 Hz ausgeführt, so bleibt die Schallstärke, wenn wir uns um 360° drehen, während der ganzen Drehung beinahe unverändert; auch gelingt es nicht, eine wahrnehmbare Reflexion des Schalles zu erzielen.

Wären unsere Trommelfelle an der Oberfläche des Kopfes gelegen, so würden die Intensitätsunterschiede hauptsächlich durch die Schirmwirkung bedingt. Da aber unser Gehörgang etwa 4 cm lang

und ausserdem etwas spiralig gedreht ist, werden die akustischen Umstände insofern kompliziert, als ein Ton das Trommelfell nie ohne Beugung erreichen kann. Ausser der Beugung müssen wir auch die Reflexion des Schalles in den verschiedenen Teilen der Ohrmuschel und des Gehörganges berücksichtigen, da ja die Bedeutung des äusseren Ohres als Schallfänger ohne weiteres verständlich ist. Die Reflexion und die Beugung des Schalles sind also stets beim Hören miteinander verbunden, und zwar in der Weise, dass die Beugung bei den niederen, die Reflexion bei hohen Frequenzen massgebend ist.

Bei den folgenden Untersuchungen gehe ich von der Tatsache aus, dass bei der gleichen Vp. und gleichbleibender Frequenz auch die Hörschwellenintensität konstant bleibt [vgl. TRÖGER (1930)]. Misst man die Tonstärke eines von der Vp. entfernt stehenden Lautsprechers, die eine eben merkbare Empfindung (Schwellenempfindung) hervorruft, und lässt die Vp. eine Drehung ausführen, so verändern sich die erwähnten physikalischen Faktoren, und man kann aus dem Betrag, um welchen die Intensität des Lautsprechers zwecks Erzielung derselben Schwellenempfindung verändert werden muss, ein Mass für den Einfluss dieser Faktoren gewinnen.

Da die Zahl aller möglichen Schallrichtungen unendlich ist, habe ich meine Untersuchungen in der Weise begrenzt, dass ich die Intensitätsunterschiede nur in den drei Hauptebenen, in der *Horizontalebene*, der *Frontalebene* und der *Sagittalebene* (*Medianebene*) festgestellt habe. Die Töne wurden mit dem Sinusstromgenerator und dem Lautsprecher erzeugt; durch regulierbare Serien- und Parallelwiderstände konnte die Lautstärke in die Grössenordnung der Schwellenwerte gebracht werden, ohne dass die bequeme Ablesung an dem Wechselstrommesser (Milliamperemeter mit zwei Gleichrichterröhren) verloren ging. Die Vp. sass auf einem drehbaren Sessel im Aufnahmezimmer in der Mitte eines Kreises von 3 m Durchmesser. Der Kreis war durch 12 Radien in Sektoren von je 30° geteilt. Der Lautsprecher befand sich in 5 m Entfernung von der Mitte des Kreises in der Richtung des mit 0° bezeichneten Radius und in Höhe der Ohren der Vp. Das eine Ohr der Vp. wurde sorgfältig mit Wachs oder Ohropax verstopft, und danach die Bestimmung der der absoluten Hörschwelle entsprechenden Stromstärke in den Richtungen von 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300° und 330° ausgeführt. Die Einstellung des

Ohres in die verschiedenen Richtungen wurde durch entsprechende Drehungen des Sessels erzielt. Die Bestimmung der relativen Hörschwellen wurde für die Frequenzen 200, 400, 800, 1600, 3200 und 6400 Hz bei zwei Vpn. vorgenommen. Für jeden Wert wurden mindestens 3 Bestimmungen ausgeführt, aus denen der Mittelwert berechnet wurde.

Tabelle 1.

Die relativen Hörschwellen in verschiedenen Schallrichtungen bei 3200 Hz.

	mA	Verhältniszahl
0°	11	1.57
30°	7	1.00
60°	8	1.14
90°	12	1.71
120°	19	2.71
150°	22	3.14
180°	23	3.29
210°	26	3.71
240°	33	4.71
270°	30	4.29
300°	27	3.86
330°	30	4.29

Tabelle 1, die ich als Beispiel heranziehe, zeigt die Schwellenwerte der Vp. N. H. bei der Frequenz 3200. Das linke Ohr der Vp. war verstopft. In der ersten Kolumne sind die Winkelgrade, in der zweiten die direkten Ablesungen von dem Milliampereometer wiedergegeben, und in der dritten Kolumne ist der kleinste Schwellenwert = 1 gesetzt und die übrigen Werte darauf bezogen. Dies erwies sich als notwendig, um das Ergebnis der Untersuchung in der Weise anschaulich machen zu können, wie es aus Abb. 5 hervorgeht. Jeder untersuchten Richtung entspricht hier ihre eigene Kurve, in der die Frequenzen auf der Abszisse und die relativen Schwellenwerte (im Verhältnis zum kleinsten Wert derselben Frequenz) auf der Ordinate abgetragen sind. Man sieht, dass die Schwellenwerte in der *Horizontalebene* seitlich und vorn-seitlich von dem offenen Ohr am kleinsten sind, während die symmetrisch zu ihnen gelegenen Richtungen die grössten Schwellenwerte aufweisen. Ferner sieht man, dass die Erhöhung der Schwelle bei den Frequenzen 200 und 400 nur sehr klein ist, während bei den hohen Frequenzen die absolute Schwelle des abgewandten Ohres um 5—8 mal höher liegt als die absolute Schwelle des dem Lautsprecher zugewandten Ohres.

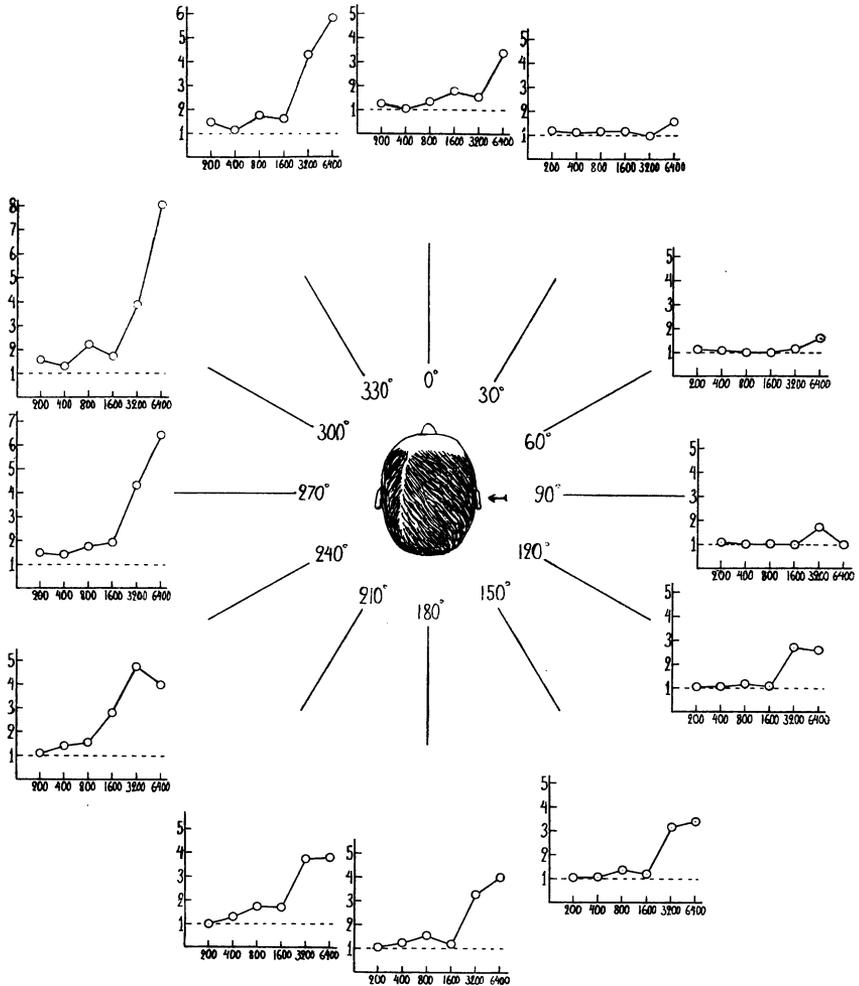


Abb. 5.

Die relativen Hörschwellen bei verschiedenen Frequenzen in der Horizontalebene.

Die Schwellenbestimmung in der *Frontalebene* fand in der Weise statt, dass die Vp. auf einem tischartigen Gestell auf dem Rücken lag; an dem einen Ende dieses Gestells war eine Eisenstange befestigt und rechtwinklig nach oben gebogen. Die Stange endete in einer kleinen Platte, die ein kleines Gummikissen trug. Dies Kissen diente als Stütze für das Hinterhaupt der Vp. Für die Bestimmung der Schwellenwerte in den verschiedenen Richtungen wurde das Gestell

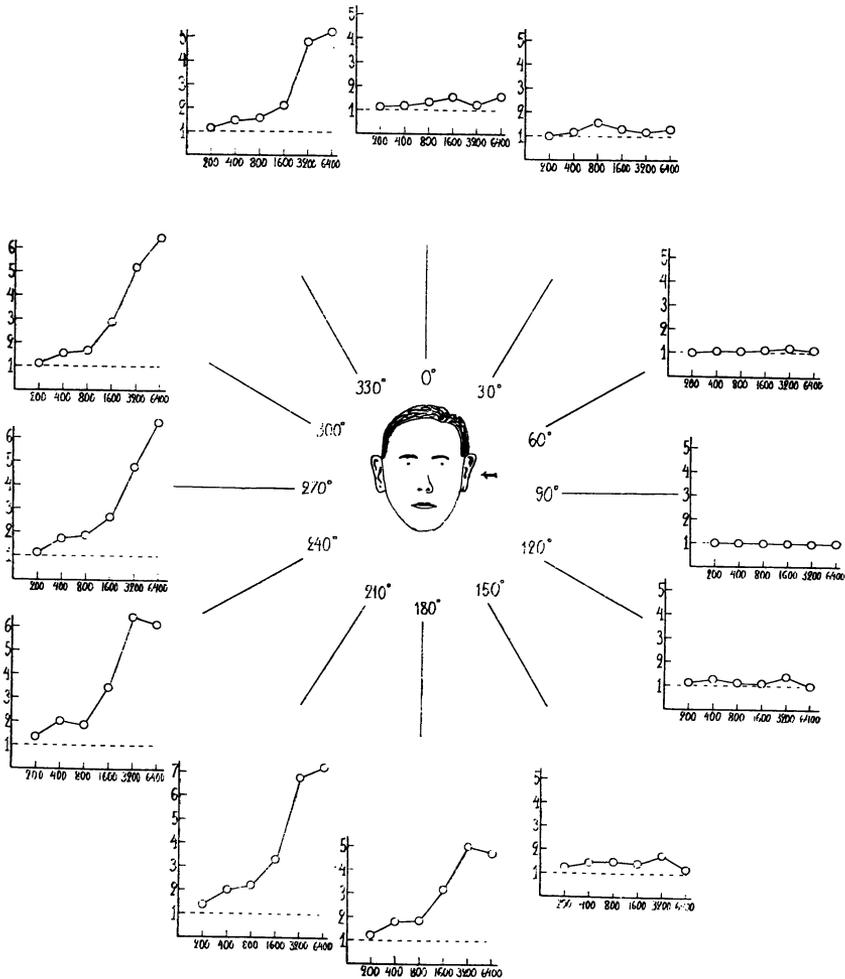


Abb. 6.

Die relativen Hörschwellen bei verschiedenen Frequenzen in der Frontalebene.

mit der Vp. in der Weise gedreht, dass der Kopf der Vp. sich stets im Mittelpunkt des Kreises befand und die Füße einen Kreisbogen von 360° beschrieben. Aus Abb. 6 gehen die für das offene linke Ohr bestimmten Werte hervor. Man sieht, dass das Optimum der Hörbarkeit in der Seitenrichtung liegt; im übrigen gilt das im Zusammenhang mit der Horizontalebene Gesagte auch hier.

Für die Untersuchung in der *Sagittal*(= *Median*)*ebene* wurde

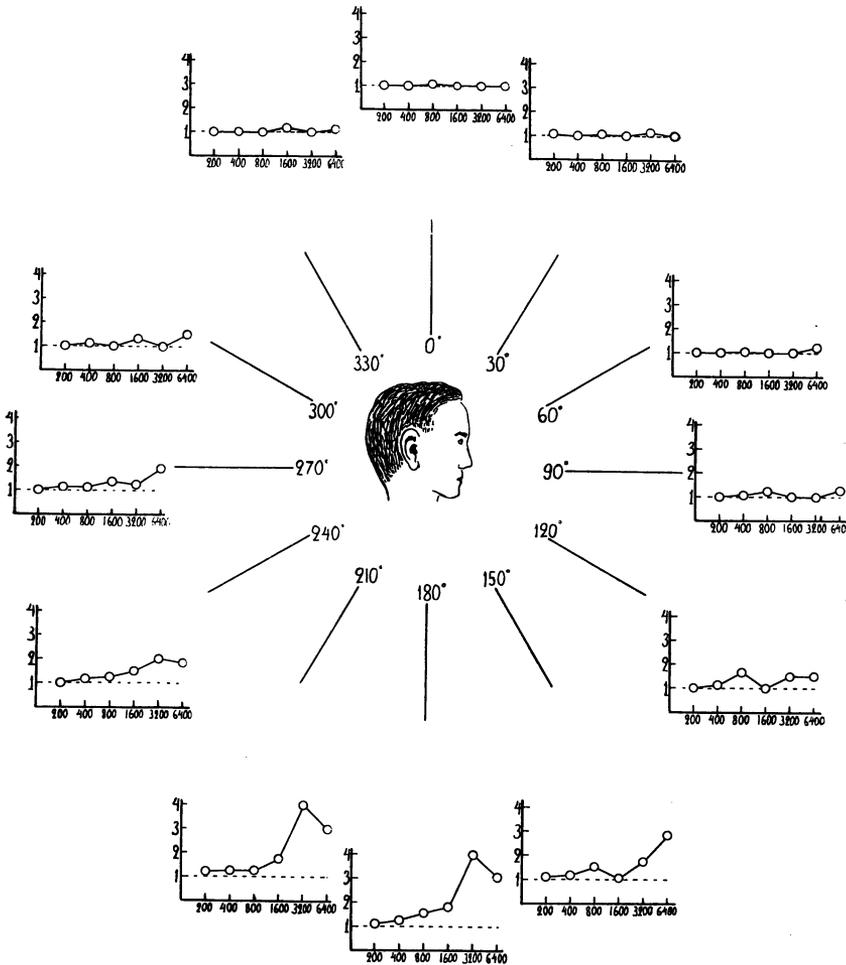


Abb. 7.

Die relativen Hörschwellen bei verschiedenen Frequenzen in der Medianebene.

das gleiche Gestell verwendet wie bei der Frontalebene. Die Vp. lag auf der einen Seite, das verstopfte Ohr nach unten, mit dem Kopf auf der Stütze. Aus Abb. 7 ersehen wir, dass die Variationen der Schwellenintensitäten hier im allgemeinen kleiner sind als in der Horizontal- und Frontalebene. Dieser Umstand findet seine Erklärung darin, dass der Gehörgang in jeder Stellung der Vp. einen rechten Winkel mit der Schallrichtung bildet und die optimale

Schwellenintensität infolgedessen eine grössere sein wird als in der Horizontal- und Frontalebene.

Die Schwellenwerte in den Abb. 5, 6 und 7 gelten für die Vp. N. H. (männl., normalhörig, Alter 21 Jahre). Die bei der anderen Vp. K. V. gefundenen Werte wichen in Einzelheiten von den bei N. H. gefundenen bedeutend ab; das Gesamtbild war aber ungefähr dasselbe. Die Unterschiede zwischen den unter gleichen symmetrischen Bedingungen für das rechte und das linke Ohr erhaltenen Werte waren bei niedrigen Frequenzen gering, bei höheren bedeutender.

Werden die erhaltenen Schwellenwerte bei den verschiedenen Schallrichtungen auf einem Perimeterzettel in der Weise notiert, dass der Abstand der Punkte vom Mittelpunkt den absoluten Intensitätsschwellen in den entsprechenden Richtungen proportional ist, so ergibt sich, wenn die Punkte miteinander verbunden werden, bei den niedrigen Frequenzen eine beinahe kreisrunde Figur. Bei den höheren Tonfrequenzen wird die Figur um so unregelmässiger, je höher der Ton ist. Aller Wahrscheinlichkeit nach liegt die Ursache hierfür in den komplizierten Beugungs- bzw. Reflexionsverhältnissen an den Ohrmuscheln und im Gehörgang, deren Wirkung, wie wir schon früher erwähnt haben, bei den höheren Frequenzen immer stärker hervortritt. Wie wir im Zusammenhang mit der später folgenden Besprechung dieser Umstände ersehen werden, ist es hier zwecklos, Ergebnisse der mit verschiedenen Vpn. ausgeführten Versuchsreihen etwa durch Berechnung der Mittelwerte miteinander zu vereinigen, weil dadurch die für unser Richtungshören wichtigen, individuellen, den jeweiligen anatomischen Eigenschaften entsprechenden Intensitätsvariationen ausgeglichen werden könnten und wir ein zwar einfaches, aber falsches Bild von diesen Erscheinungen erhalten würden [vgl. TRÖGER (1930)].

Die Untersuchung anderer äusserer Faktoren des Richtungshörens als desjenigen der Intensität ist durch subjektive Methoden kaum möglich. Im nächsten Kapitel wird das »elektrisch hörende« Phantom für die Erklärung dieser Faktoren herangezogen.

#### *Phantomversuche zur Untersuchung der Intensitäts- und Zeitunterschiede beim Richtungshören.*

Wenn es möglich wäre, die Schwingungen in beiden Gehörgängen bei der Einwirkung eines Schalles oszillographisch aufzuzeichnen, so könnten wir dadurch nicht nur Klarheit über die Intensitätsver-

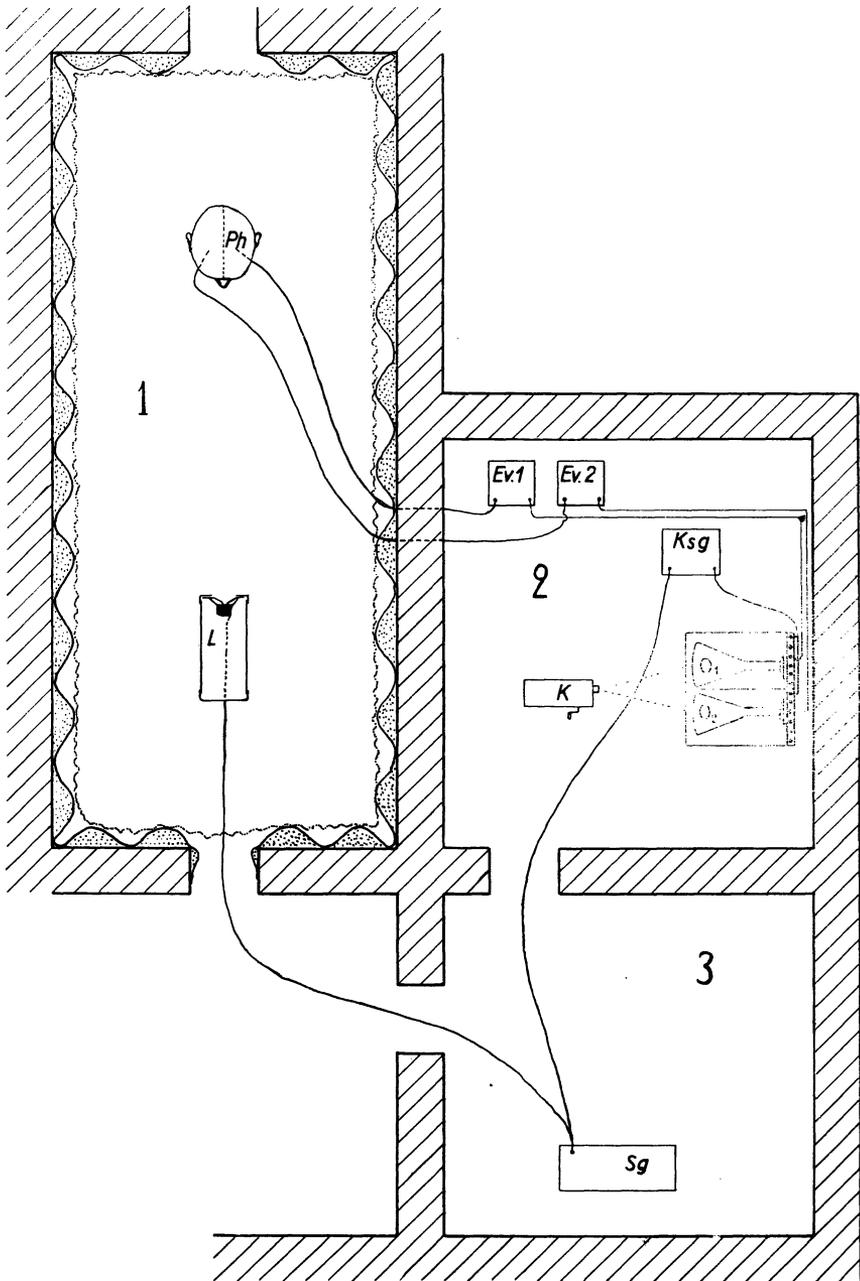


Abb. 8.

Schema der Versuchsanordnung bei den Phantomversuchen.

hältnisse dieser Schwingungen, sondern auch über die Zeitunterschiede gewinnen, die dadurch entstehen, dass sich das eine Ohr näher als das andere an der Schallquelle befindet. Bei den Dauertönen erscheinen diese Zeitunterschiede als Unterschiede in der Wellenphase, und wie wir uns aus dem geschichtlichen Überblick erinnern, haben manche Forscher diesen Phasenunterschieden eine grosse Bedeutung für die Lokalisation des Schalles zugeschrieben.

Um diese Verhältnisse klarzulegen, wurde das früher beschriebene Phantom gebaut (s. S. 18). Meine Versuchsanordnung geht aus Abb. 8. hervor. Das Zimmer 1 ist der Aufnahmeraum, 2 das Analysierzimmer und 3 das Generatorzimmer. Das Kopfphantom Ph war an der Decke des Aufnahmeumes in 1.5 m Höhe über dem Fussboden aufgehängt. Durch biegsame Leitungen war das Phantom mit den unterhalb desselben auf dem Fussboden befindlichen Heiz- und Anodenbatterien und mit den Stöpselkontakten an der Kontakttafel des Aufnahmeumes verbunden. Der Lautsprecher L befand sich gleichfalls im Aufnahmeum; er lag auf einem Gestell in gleicher Höhe wie das Phantom und 4 m von diesem entfernt. Der Sinusstromgenerator Sg lieferte die zur Erzeugung der Töne dienenden Wechselströme. Im Analysierzimmer befanden sich die beiden Endverstärker Ev. 1 und Ev. 2, deren Ausgangskreise mit den Kathodenstrahloszillographen  $O_1$  und  $O_2$  in Verbindung standen. Das Kippspannungsgerät Ksg erteilte den beiden Kathodenstrahlen eine vertikale Bewegung. Die zur Synchronisierung der Kippfrequenz nötigen, mit den zu registrierenden Vorgängen homorhythmischen Wechselspannungen wurden dem Sinusstromgenerator Sg direkt entnommen. Wurde der Kathodenstrahl in der horizontalen Richtung durch den zu analysierenden, von den Schwingungen der »Trommelfelle« herrührenden Wechselspannungen abgelenkt, so erschien auf der fluoreszierenden Fläche der Braunschen Röhre ein stehendes Bild des von dem Phantom »gehörten« Schalles. Durch Regelung der Kippfrequenz konnte man eine beliebige Anzahl von Schwingungen auf dem fluoreszierenden Schirm stehen lassen; die Anzahl, die sich als die praktischste erwies, war 3—6. Die stehenden Schwingungsbilder beider Oszillographen wurden durch die Kino-Aufnahme-Kamera K auf einen und denselben Film photographiert und nachher mit einem Vergrösserungsapparat auf Papier kopiert.

Abb. 9 stellt eine Untersuchung bei der Tonfrequenz 3 200 Hz dar. Die aus dem linken »Ohr« stammenden Aufnahmen sind mit L, die aus dem rechten mit R bezeichnet. An der linken Seite der Bildserien sind die Winkelgrade angegeben, um welche das Phantom in bezug auf den Lautsprecher gedreht wurde. Die erste Aufnahme wurde bei  $0^\circ$  gemacht; hierbei befand sich der Lautsprecher vorn in der Medianebene. Dann wurde das Phantom um  $10^\circ$  nach rechts, also im Sinne des Uhrzeigers gedreht, eine neue Aufnahme gemacht und in dieser Weise in Abständen von je  $10^\circ$  fortgefahren. Bei  $90^\circ$  lag der Lautsprecher auf der linken Seite in der Ohrenachse,

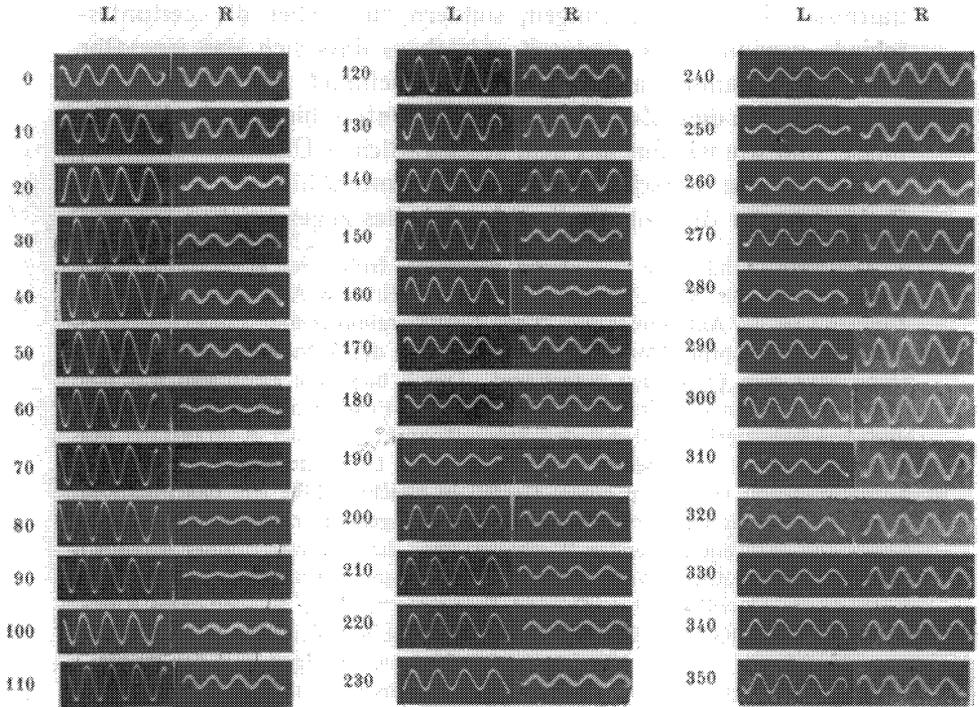


Abb. 9.

Phantomaufnahmen des rechten u. linken »Ohres« bei 3 200 Hz in verschiedenen Schallrichtungen.

bei  $180^\circ$  hinten in der Medianebene und bei  $270^\circ$  in der Ohrenachse auf der rechten Seite.

Betrachten wir das erste Bildpaar der Abb. 9, wo der Lautsprecher vorn in der Mediane lag, so sehen wir, dass die beiden Bilder ziemlich identisch sind. (Die etwas geringere Schärfe des rechten Bildes beruht auf der nicht so guten Konzentrierung des Kathodenstrahles, ist aber sonst bedeutungslos). Bei Drehung des Phantoms nach rechts wächst die Amplitude auf der linken Seite, während sie sich auf der rechten Seite vermindert. Bei  $70^\circ$ — $90^\circ$  ist der Amplitudenunterschied am grössten, und bei weiterer Drehung des Phantoms nach rechts werden die Amplitudenunterschiede immer kleiner. Bei  $150^\circ$ — $160^\circ$  bemerkt man eine Unregelmässigkeit, bei  $180^\circ$  sind beide Kurven, wie auch zu erwarten steht, von gleicher Amplitude. Zwischen  $200^\circ$ — $230^\circ$  ist die Amplitude entgegen unseren Erwartungen auf der rechten Seite kleiner als

auf der linken; von da an wird der Ton auf der rechten Seite stärker. Den maximalen Intensitätsunterschied sieht man bei  $280^\circ$ , und bei  $350^\circ$  hat der Intensitätsausgleich schon stattgefunden.

Die Unregelmässigkeiten, die man bei näherer Betrachtung dieser Tonaufnahmen wahrnimmt, finden ihre Erklärung wohl zum grossen Teil in den »anatomischen« Eigenschaften des Phantoms. Die Form der Ohrmuscheln des als Modell dienenden Kopfes war nicht auf beiden Seiten gleich; ebenso waren die Gehörgänge von verschiedener Weite und Krümmungsform. Es war aber nicht zweckmässig, diesen Sachverhalt zu ändern. Bei den wenigsten Menschen ist das eine äussere Ohr ein getreues Spiegelbild des anderen; die Menge und die Lage des Ohrenschalzes kann auch verschieden sein.

Bevor wir die bei allen untersuchten Frequenzen gemessenen Intensitätsunterschiede zur näheren Darstellung bringen, soll noch ein anderer Umstand besprochen werden. Vielleicht hat der Leser schon bemerkt, dass der Anfang der Kurven öfters auf verschiedene Teile der Wellenlinie, d.h. auf verschiedene *Phasen* entfällt. Betrachten wir die Tonkurven von  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , so sehen wir, dass ihr Anfang gleichphasig ist. Dies ist auch natürlich, weil der Abstand von den Ohren zur Schallquelle in den beiden genannten Stellungen des Phantoms die gleiche ist. Vergleichen wir aber die Tonkurven von  $0^\circ$  und  $10^\circ$ , so sehen wir, dass in der letztgenannten Stellung das linke Ohr in einer früheren und das rechte Ohr in einer späteren Phase als bei  $0^\circ$  reagiert hat. Dies ist die Folge davon, dass das linke Ohr der Schallquelle nähergekommen ist und das rechte Ohr sich von ihr entfernt hat. Dieser Phasenunterschied, der bei  $30^\circ$  schon eine volle Periode überschritten hat, vergrössert sich bis  $90^\circ$ , um sich danach bis  $180^\circ$ , wo er 0 beträgt, zu verkleinern. Bei weiterer Drehung des Kopfes geht die Phase des rechten Ohres voran; dieser Phasenunterschied erreicht sein Maximum bei  $270^\circ$ , um sich dann wieder zu verkleinern, bis er bei  $360^\circ = 0^\circ$ , wie schon früher erwähnt, nicht mehr existiert.

Ist die Frequenz des Tones bekannt, so können wir den Zeitunterschied in Sek. ermitteln, indem wir den Phasenunterschied durch die Frequenz teilen. Da die Schallgeschwindigkeit in Luft, wie wir wissen, bei Zimmertemperatur etwa 340 m in der Sek. beträgt, so erhalten wir den wirksamen Weglängenunterschied in cm durch Multiplikation des Zeitunterschieds mit 34000. In Abb. 10 sind die Weglängenunterschiede bei der Frequenz 1600

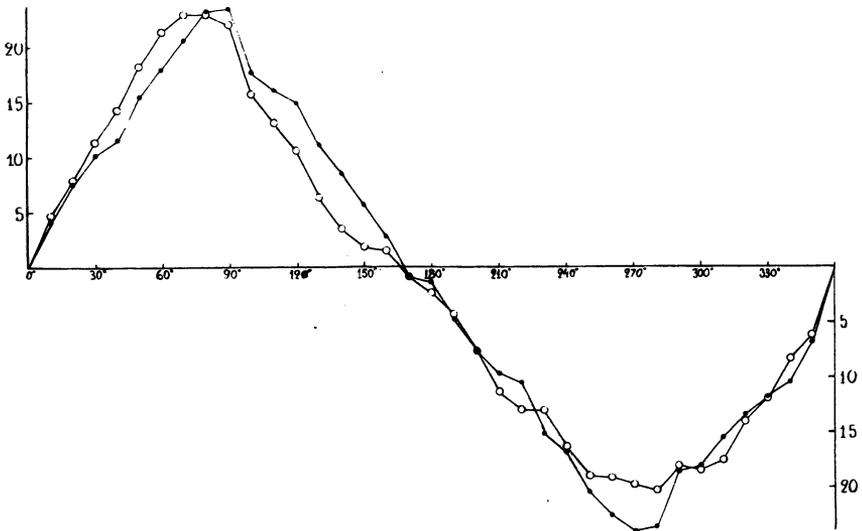


Abb. 10.

Die Weglängenunterschiede in ihrer Abhängigkeit vom Seitenwinkel bei 1 600 (Kreispunkte) und 3 200 Hz am Phantom gemessen.

(Mittelwerte aus 3 Messungen) und bei 3 200 (Mittelwerte aus 2 Messungen) als Funktion des Eingangswinkels graphisch dargestellt. Auf den ersten Blick erkennt man die annähernde Sinusform dieser Kurven. Aus dem geschichtlichen Teil erinnern wir

Tabelle 2.

Intensitätsunterschiede bei den Frequenzen 200, 400 und 800. Mittelwerte aus 2 Messungen bei jeder Frequenz.

Winkel	Fr. 200		Fr. 400		Fr. 800	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
0°	96.5	81.0	39.5	42.0	58.5	58.0
30°	93.0	90.5	79.5	52.0	82.5	33.0
60°	96.5	94.0	97.5	66.0	100.0	30.5
90°	96.5	90.5	100.0	64.0	82.5	29.0
120°	100.0	81.0	76.5	53.5	80.5	18.5
150°	96.5	81.0	52.0	36.5	69.0	48.5
180°	100.0	81.0	33.5	45.0	54.5	64.5
210°	100.0	87.5	45.5	65.5	35.5	68.5
240°	100.0	94.0	62.0	93.0	25.0	88.0
270°	100.0	100.0	62.0	100.0	23.0	100.0
300°	100.0	96.5	49.5	72.5	15.0	96.0
330°	93.0	96.5	38.5	55.5	22.0	86.0

Tabelle 3.

Intensitätsunterschiede bei den Frequenzen 1600 und 3200.

Winkel	Fr. 1 600		Fr. 3 200	
	links	rechts	links	rechts
0	90	56	50	80
10	90	50	87.5	60
20	100	30	100	50
30	100	24	100	24
40	97	27	100	10
50	91	30	94	40
60	81	41	96	44
70	83	44	100	30
80	86	41	100	24
90	90	24	81	18
100	95	19	69	44
110	100	44	75	50
120	95	60	81	32
130	86	63	81	24
140	80	68	50	50
150	72	68	69	36
160	67	68	81	14
170	67	68	87.5	30
180	72	76	81	50
190	57	80	43.5	50
200	48	83	50	70
210	48	94	50	80
220	33	100	7.5	56
230	14	100	12.5	40
240	9	94	25	40
250	29	94	37.5	50
260	43	92	37.5	50
270	43	89	31.5	80
280	19	89	16	80
290	24	89	44	90
300	52	89	37.5	100
310	62	89	15	100
320	71	86	19	90
330	76	86	35	80
340	86	86	56	60
350	71	83	62.5	60

uns der von v. HORBOSTEL und WERTHEIMER (1920) aufgestellten Beziehung:  $\sin \varphi = \frac{\Delta s}{k}$ , worin  $\Delta s$  der Weglängenunterschied,  $\varphi$  die Abweichungswinkel von der Mediane und  $k$  die experimentell bestimmte Konstante = 21 cm ist. Bei 90° Abweichung von der

Mediane ist der Weglängenunterschied nach den genannten Autoren  $i_{s_{90^\circ}} = k = 21$  cm. Wie man aus der Abb. 10 ersieht, würde dieser maximale Weglängenunterschied bei meinen Versuchen einen Wert von etwa 24 cm erhalten. Es muss aber erwähnt werden, dass der Leichenkopf, der als Modell des Phantoms diente, ungewöhnlich gross war. Für Köpfe von normaler Grösse würde also die v. HORNBOSTEL-WERTHEIMERSche Konstante meines Erachtens gelten.

Kehren wir wieder zu den *Intensitätsunterschieden* zurück! Tabelle 2 zeigt die mit dem Phantom gemessenen Intensitätsunterschiede bei den Frequenzen 200, 400 und 800 Hz in Winkelabständen von je  $30^\circ$ , Tabelle 3 die Intensitätsunterschiede bei den Frequenzen 1 600 und 3 200 Hz, gemessen in Abständen von je  $10^\circ$ . In diesen Tabellen ist die maximale Intensität mit 100 bezeichnet und die anderen Intensitäten sind in Prozenten der maximalen angegeben. Aus den Tabellen geht hervor, dass die Tonamplituden in den Gehörgängen ihre maximalen Werte (100) meistens dann erreichen, wenn die Schallquelle sich in der Nähe der Seitenrichtung des betreffenden Ohres (links  $90^\circ$ , rechts  $270^\circ$ ) befindet. Das auf der »Schattenseite« befindliche Ohr dagegen bietet hierbei seine kleinsten Tonamplituden dar. Die kleinste Amplitude ist bei 200 Hz links 93 (rechts 81), bei 400 Hz 33.5 (36.5), bei 800 Hz 15 (18.5), bei 1 600 Hz 9 (19) und bei 3 200 Hz 7.5 (10) Prozent von der höchsten. Es ist auch ersichtlich, dass bei höheren Frequenzen Richtungsänderungen von  $10^\circ$  schon grosse Variationen in der Intensität des Tones mit sich bringen, und dass diese Variationen oft sehr unregelmässig stattfinden. Diese Beobachtungen stimmen sowohl mit den theoretischen Erörterungen (s. S. 21) als mit den früher besprochenen Bestimmungen der Intensitätsunterschiede mittels der Hörschwellenmethode gut überein. Eine genaue Korrelation zwischen den Ergebnissen dieser zwei prinzipiell ganz verschiedenen Versuchsmethoden ist nicht zu erwarten; ist es doch kaum möglich, den Kopf nebst den Ohren eines Menschen so nachzubilden, dass er akustisch vollkommen gleichwertig mit dem Vorbild wäre. Ausserdem haben wir ja auf S. 27 gelesen, dass auch bei einer und derselben Vp. die unter gleichen symmetrischen Bedingungen für das rechte und das linke Ohr erhaltenen Werte insbesondere bei hohen Frequenzen sehr verschieden sein konnten.

In der Natur werden solche reinen Sinustöne, wie sie z.B. bei diesen Untersuchungen verwendet worden sind, fast niemals ange-

treffen, sondern dort handelt es sich entweder um Klänge oder Geräusche. Wir können uns im voraus vorstellen, wie ein solcher Klang, der sich bekanntlich aus einem Grundton und einem oder mehreren harmonischen Teiltönen zusammensetzt, aus verschiedenen Richtungen auf unser Ohr wirken wird. Je mehr der Kopf und das äussere Ohr, und falls der Schall von unten kommt, die Schultern usw. die freie Strahlung des Schalles verhindern, in um so geringerem Umfang können die höheren Teiltöne an der Bewegung des Trommelfells beteiligt sein, während der Grundton und die niederen Teiltöne durch die Schattenwirkung weniger beeinträchtigt werden. Daraus folgt, dass die Klangfarbe, die ja von den quantitativen Verhältnissen zwischen dem Grundton und den Obertönen abhängig ist, je nach der Schallrichtung verschieden ausfällt. Diese Verschiedenheiten treten umso stärker hervor, je mehr Teiltöne der Klang enthält. Man kann sagen, dass bei einem teiltonreichen Klang jeder Hörrichtung eine verschiedene Klangfarbe entspricht. Wir hätten also auch bei einohrigem Hören die Fähigkeit, einen Schall zu lokalisieren, vorausgesetzt, dass uns seine Klangfarbe in einer bestimmten Richtung bekannt wäre. Die Lokalisation würde um so leichter gelingen, je feiner unser klanganalytisches Vermögen wäre. Man wäre somit berechtigt, von einer *Klangfarbentheorie* [KLEMM (1920) u.a.] zu sprechen.

Bei zweiohrigem Hören würde die Lokalisation des Schalles auf Grund der Klangfarbe viel genauer sein als bei einohrigem. Dabei erhält jedes Ohr sein eigenes »Klangbild«, so dass man zwei Anhaltspunkte für die Richtungsbestimmung des Schalles hat. Vergleicht man die Klangbilder des rechten und des linken Ohres, so sind dieselben, theoretisch betrachtet, nur in der Medianebene identisch, während sie in allen anderen Richtungen voneinander abweichen. Um diesen Umstand zu veranschaulichen, wurde ein Klang von der Grundfrequenz 800 Hz, der einen schwachen zweiten und einen starken dritten Oberton durch eine mit Absicht erzeugte nicht-lineare Verstärkung enthielt, mit dem Phantom auf gleiche Weise wie der Ton in Abb. 9 in den Richtungen der Horizontalebene oszillographiert (Abb. 11.)

Ausser dem, was oben über die Klangfarbenunterschiede mitgeteilt wurde, ist aus Abb. 11 ersichtlich, dass die Phasenunterschiede der Obertöne, deren Tonhöhe entsprechend, grösser sind als diejenigen des Grundtones. Indessen sieht man bei näherer Betrachtung von dieser Regel hier und da kleinere Abweichungen,

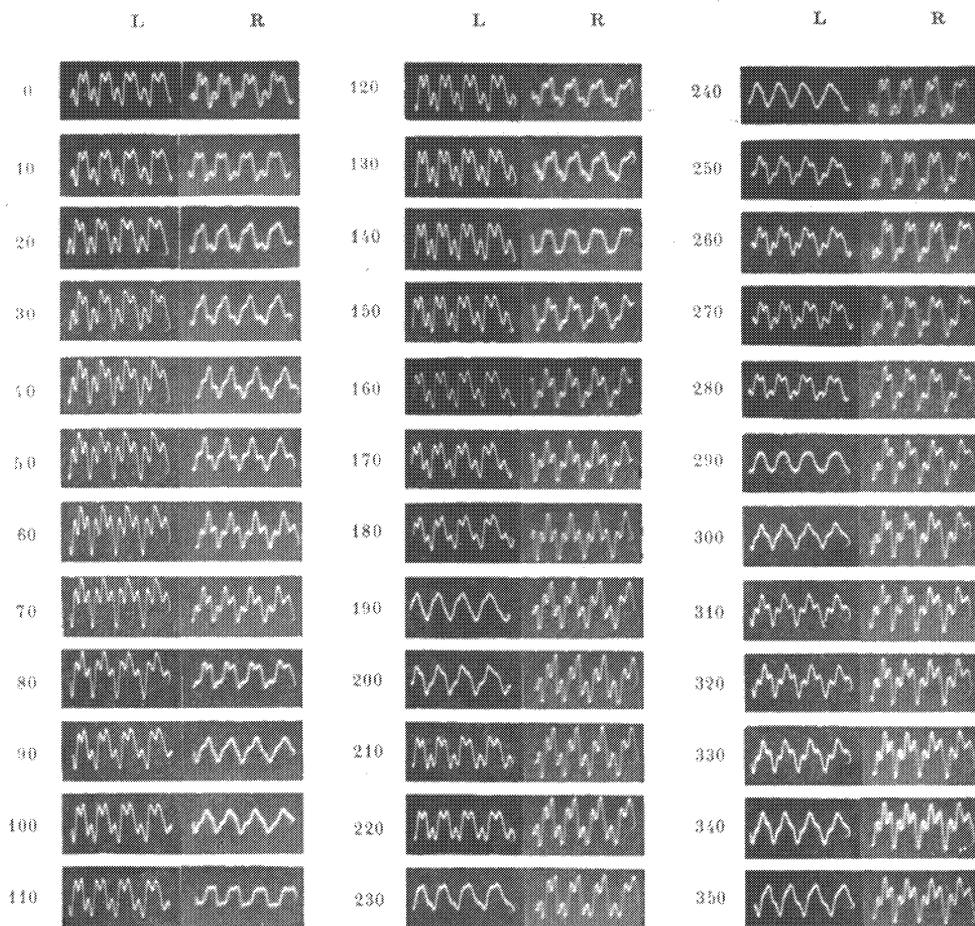


Abb. 11.

Phantomaufnahmen des rechten u. linken »Ohres« beim teiltonreichen Klang;  
Frequenz 800 Hz.

die als Phasenverschiebungen zum Ausdruck kommen. Diese finden ihre Erklärung wohl darin, dass der wirksame Ohrenabstand ( $k = 21$  cm) für verschiedene Frequenzen etwas variiert, wie auch die Berechnungen von HARTLEY und FRY (1921) zeigen. Die Phasenverschiebungen, die als Beweis dafür gelten, dass der Weg des Schalles zum Trommelfell bei verschiedenen Frequenzen infolge der Reflexionen und Beugungen verschieden lang ist, haben aber nach v. HELMHOLTZ (1913) keinen Einfluss auf die Klangfarbe.

*Die Bedeutung der Geräusche für das Richtungshören im Lichte der obigen Ergebnisse.*

Geräusche werden solche Schallvorgänge genannt, welche hauptsächlich unperiodische Bestandteile enthalten. Man kann keine scharfe Grenze zwischen den Klängen und den Geräuschen ziehen, da manche Geräusche auch Klangkomponenten enthalten können, ebenso wie manchen Klängen oft unperiodische Schallvorgänge beigemischt sind. Durch die modernen automatischen Klanganalysatoren, um deren Entwicklung sich u.a. GRÜTZMACHER und MEYER (1927) verdient gemacht haben, ist es möglich geworden, die Zusammensetzung beliebiger Schälle zu untersuchen und graphisch in der Form der sog. Frequenzspektren darzustellen. Diese Frequenzspektren sind Kurven, deren Abszisse von der Frequenz und deren Ordinate von der Intensität jedes Teiltones des untersuchten Schalles gebildet wird. Das Frequenzspektrum eines Klanges besteht aus Linien, die, ähnlich wie die Flammenspektren verschiedener chemischer Stoffe in regelmässigen Abständen auf der Abszisse stehen. Wird in gleicher Weise irgendein reines Geräusch analysiert, so erhält man ein kontinuierliches Spektrum, dessen Höhe in bezug auf die Abszisse variieren kann, das sich jedoch durch seine Kontinuität von dem Klangspektrum ebensostark unterscheidet wie das breite Farbenband des Sonnenlichtes von den Spektrallinien gewisser Stoffe. Ebenso wie das Sonnenspektrum aus den Spektrallinien verschiedener Elemente zusammengesetzt ist, besteht auch das Geräuschspektrum aus unzähligen Teiltonkomponenten.

Gewisse Klänge zeigen in ihrem Spektrum neben den Teiltonstrichen auch Bereiche mit kontinuierlichem Untergrund. Hierher gehören z.B. die tieferen Töne des Klaviers, bei denen der kontinuierliche Anteil des Spektrums im wesentlichen vom Anschlag der Seite selbst herrührt (MEYER und BUCHMANN, 1931). Manche Geräusche zeigen neben einem kontinuierlichen Untergrund einzelne diskrete Teiltöne, die an verschiedenen Resonanzstellen des geräuscherzeugenden Apparates entstehen (LÜBCKE, 1934).

An einem brausenden Wasserfall, in einem Schnellzug oder in irgendeinem anderen geräuschvollen Ort kann man leicht einen Versuch anstellen, der die Zusammensetzung des Geräusches aus einzelnen Teiltonkomponenten bestätigt. Man legt die Hand so auf das Ohr, dass zwischen ihr und dem äusseren Ohr ein Hohlraum entsteht. Man lässt nur einen kleinen Spalt zwischen der Hand und

der Jochbeingegend offen, und hört beim Verändern der Grösse dieses Spaltes und des erwähnten Hohlraumes deutlich, wie das Geräusch einen klangähnlichen Charakter annimmt, wobei sich die Tonhöhe mit der Spaltgrösse verändert. Ein musikalischer Mensch kann sich nach einiger Übung einen Spass daraus machen, beliebige Melodien auf diese Weise abzuspielen. Die Erklärung dieses Phänomens ist eine einfache: es handelt sich nur um einen veränderlichen Resonator, der diejenigen Teiltöne verstärkt, auf die er abgestimmt ist.

Nach diesen Überlegungen können wir das Richtungshören der Geräusche näher behandeln. Befindet sich die Geräuschquelle in der Medianebene, so erhalten beide Ohren, theoretisch betrachtet, ein hinsichtlich des Frequenzspektrums gleiches Bild; wird die Geräuschquelle aber nach einer Seite verschoben, so verändern sich die Spektren beider Ohren in der Weise, dass das Spektrum des zugewandten Ohres besonders bei den höheren Frequenzen erhöht ist, während es in dem entgegengesetzten Ohr eine entsprechende Senkung aufweist. Unser Richtungshören bei Geräuschen auf Grund des Schallfarbenunterschieds unterscheidet sich von demjenigen von Klängen in der Hauptsache darin, dass bei den ersteren bei der Beurteilung der Schallrichtung auch die kleinsten Nuancen in der Schallfarbe beachtet werden, da das Geräuschkontinuum, wie erwähnt, kontinuierlich ist. Wir sehen also, dass die Geräusche in dieser Beziehung von allen Schällen am leichtesten lokalisierbar sein müssen.

Da die Intensitätstheorie, die sich auf die in der Natur fast nie vorkommenden reinen Töne beschränkt, hiernach ihre Bedeutung verliert, schlage ich vor, sie in *Schallfarbentheorie* umzutaufen. [Die Benennung »Klangfarbentheorie« (s. S. 35) bezieht sich, wörtlich gefasst, nur auf Klänge].

Beim Anhören eines fortdauernden Klanges wird uns seine vollkommene zeitliche Kontinuität d. h. der Umstand auffallen, dass dieser monotone Inhalt während seiner Dauer unverändert bleibt. Es ist schwer zu verstehen, wie wir unter solchen Verhältnissen auf Grund der Phasenunterschiede eine klare Auffassung von den Weglängenunterschieden erhalten könnten. Auch dadurch verringert sich die Bedeutung der Phasenunterschiede, dass dieselben oberhalb 800 Hz zweideutig und oberhalb 1600 Hz bedeutungslos werden (vgl. S. 13). Das optimale Frequenzgebiet der Ohrempfindlichkeit fängt erst oberhalb dieser Frequenz an (WIEN 1903, WILSKA

1935). Zu diesem optimalen Gebiet gehören wohl die meisten von uns gehörten Schalleindrücke: der hauptsächlichste Teil der Geräuschkomponenten, die Formanten der meisten Sprachlaute, ein wichtiger Teil der Klänge von Musikinstrumenten sowie die Lautäusserungen der meisten Tiere. Es widerspräche dem Zweckmässigkeitsprinzip, wenn die am besten hörbaren und am reichlichsten vorkommenden Tonfrequenzen keine Bedeutung für das Richtungshören hätten.

Man sieht, dass die Phasentheorie das Richtungshören bei diesen wichtigsten Schällen nicht erklären kann. Ebenso wenig wird die Lokalisation fortdauernder Töne oder Klänge durch die Zeittheorie erklärt, da sie, wie erwähnt, monoton sind. Bei den Geräuschen verhält es sich etwas anders. Ein Geräusch in seiner reinen Form enthält nichts Periodisches, Monotones, sondern es ist beständig veränderlich, von zeitlichen Diskontinuitäten erfüllt. Befindet sich die Geräuschquelle ausserhalb der Medianebene, so liefert jede Diskontinuität eine »Zeitmarke« des wirksamen Weglängenunterschieds zwischen den Ohren. Da die Anzahl der »Zeitmarken« bei einem Geräusch gross ist, wird auch das sich auf dieselben gründende Richtungsurteil genauer, und zwar um so mehr, je schärfer die Diskontinuitäten sind, d.h. je höhere Teilfrequenzen das Geräusch enthält. Nach diesen theoretischen Erörterungen wird man annehmen müssen, dass die Geräusche das massgebende Element für unser Richtungshören sind.

## Untersuchungen über die Richtungshörschärfe.

### *Allgemeines.*

Bevor ich die von mir angewandten Untersuchungsmethoden zu beschreiben beginne, will ich in aller Kürze einige von früheren Autoren benutzte Methoden referieren. Ich möchte diese Methoden in zwei Hauptgruppen, die *mittelbaren* und die *unmittelbaren* einteilen. Die beiden Gruppen unterscheiden sich darin, dass der Schall in der ersteren den Ohren durch Schläuche, Mikrophone, Kopfhörer usw. zugeleitet wird, während in der letzteren der Schallweg frei, d.h. ähnlich wie unter natürlichen Verhältnissen ist.

Von den Untersuchungsmitteln der ersten Gruppe ist die Teleskopröhre wohl das älteste und am meisten gebrauchte. In ihrer klassischen Form ähnelt sie dem Gummischlauch-Phonendoskop, dessen einer Schenkel teleskopartig verlängert und verkürzt werden kann. Auf diese Weise entstehen Weglängen- und Intensitätsunterschiede zwischen den Ohren. Man hat auch die Ohrlöcher durch Mikrophone und Kopfhörer ersetzt, und kann dadurch sowohl den Phasen- als den Intensitätsunterschied unabhängig voneinander variieren; den ersteren durch das Teleskoprohr, und den letzteren durch Regelung der Lautstärke in den Kopfhörern z.B. mittels Potentiometern. Die Erzeugung des zu untersuchenden Schalles kann entweder auf mechanischem oder elektrischem Wege erfolgen. Beim Abhören mit Kopfhörern können die beim natürlichen Hören vorkommenden Zeitunterschiede in der Weise nachgeahmt werden, dass man mit einem Apparat, der imstande ist, zwei Stromstöße in sehr kurzen und variierbaren Zwischenzeiten zu geben, einen kurzen Stromstoß zuerst in den einen und dann in den anderen Kopfhörer leitet (vgl. KLEMM 1920). Künstliche, variierbare Zeitunterschiede können auch durch das Telephon von POULSEN mit zwei Abtastmagneten erzeugt werden, deren Abstand regulierbar ist, und die mit je seinem Kopfhörer verbunden sind.

Bei der *unmittelbaren* Untersuchungsweise wird der Schall weder

durch Schläuche noch durch elektrische Kopfhörer in die Ohren geleitet, sondern befindet sich der Kopf im freien Schallfeld. Für ein erfolgreiches Experimentieren ist es jedoch notwendig, dass die nächste Umgebung akustisch möglichst »neutral« ist, so dass die störenden Nachhallvorgänge womöglich eliminiert werden. Im Freien, auf einem offenen Feld sind die akustischen Verhältnisse am günstigsten. Die niedrigen Richtungsschwellenwerte ( $1/3^\circ$ ) von W. und H. MARX (1921) finden ihre Erklärung wohl darin, dass die von den genannten Autoren ausgeführten Versuche im Freien stattgefunden haben.

Wenn wir die Richtungshörschärfe in Form eines sinnesphysiologischen Versuches untersuchen, so hat die Vp. ihr Urteil über die Richtung des von ihr gehörten Schalles in irgendeiner Weise mitzuteilen. Je nach der Versuchsanordnung und der Fragestellung der Arbeit haben die früheren Forscher verschiedene Methoden angewandt. Eine viel benutzte Untersuchungsweise ist diejenige, welche die Vp. beurteilen lässt, auf welcher Seite einer Grundebene (Medianebene, Frontalebene, Horizontalebene) der Schall erscheint. Bei manchen Untersuchungen gibt die Vp. mit dem Finger oder einem Stäbchen die Schallrichtung an. Weiterhin gibt es Methoden, bei denen die Schallrichtung durch optische Zeichen oder Vorstellungsbilder (ALLERS und SCHMIEDEK 1924) zu definieren versucht. Auch hat man der Vp. die Aufgabe gestellt, Richtungen in Winkelgraden von einer Grundrichtung zu beurteilen, gewisse Winkel zu halbieren (HOLT-HANSCH 1931) usw.

Man kann nicht leugnen, dass die erwähnten Untersuchungsmethoden für die Lösung mancher Sonderfragen des Richtungshörens sehr wertvoll sein können. Für die Bestimmung der Richtungshörschärfe sind sie aber nicht sehr geeignet. Überlässt man es der Vp. zu beurteilen, von welcher Seite der Mittellinie der Schall zu kommen scheint, so fällt es ihr nicht leicht, sich ihre subjektive Medianebene genau vorzustellen. Infolge dieser Unschärfe leidet das ganze Versuchsergebnis. Lässt man die Vp. die Richtung des Schalles zeigen, so wird das Lagegefühl der Vp. mit ins Spiel gezogen, und analoge Umstände gelten auch für optische Zeichen und Vorstellungsbilder. Auf Grund ihrer Untersuchungen sind ALLERS und SCHMIEDEK (1924) der Meinung, dass der optische und der kinästhetische Raum nicht völlig miteinander übereinstimmen, und dass die Verknüpfung zwischen der optischen Raumvorstellung und dem Schalleindruck nicht identisch mit der Verknüpfung

zwischen dem letzteren und der kinästhetischen Raumvorstellung ist. GOLDSTEIN und ROSENTHAL-VEIT (1926) haben gefunden, dass man bei akustischen Lokalisationsversuchen die besten Resultate bei Versuchspersonen mit mangelhaftem resp. fast fehlendem optischen Vorstellungsvermögen findet, und dass bei Versuchspersonen mit guter Optik die Resultate bei nichtoptischer Einstellung besser als bei optischer sind. Das gleiche dürfte meines Erachtens wohl auch dann gelten, wenn die Vp. Schallrichtungen in Winkelgraden beurteilen soll. Die Geometrie, mit der sie sich optisch und evtl. propriozeptiv-haptisch vertraut gemacht hat, braucht nicht unbedingt der Schallokalisationsgeometrie zu entsprechen. Die Klarheit der Erinnerungsbilder solcher konventionellen Einheiten wie z.B. der Winkelgrade kann bei verschiedenen Versuchspersonen sehr verschieden sein.

Es wäre sonderbar, wenn wir die Untersuchung der Sehschärfe in gewöhnlichen Fällen in der Weise vornehmen würden, dass wir die Vp. beurteilen liessen, ob ein optischer Punkt sich rechts oder links von der Medianebene befindet, oder sie auf den Punkt zeigen liessen, wie man es tut, wenn man wissen will, ob ein Starpatient das Licht projizieren kann. Die erwähnten Untersuchungsmethoden sind zu grob für die Bestimmung der Sehschärfe eines normalen Auges. Wenn wir auch sagen können, dass die Richtungshörschärfe schlechter als die Sehschärfe ist, so beträgt der Unterschied, wie wir später sehen werden, nur etwas mehr als eine Grössenordnung.

Sowohl beim Sehen als beim binauralen Hören erhalten wir Empfindungen über die subjektive Projektion der Gegenstände der Aussenwelt in bezug auf uns selbst durch Vermittlung der von ihnen ausgehenden Wellenbewegung. Der Umstand, dass unsere optischen Projektionen durch eine ungeheure Anzahl von Einzellelementen zustandekommen, während wir bei den akustischen mit nur zwei isolierten Empfängern auskommen können, beruht nur darauf, dass im ersteren Fall jeder Rezeptor seinen eigenen Raumwert besitzt, so dass die Projektion *primärer* Natur ist, während sie im letzteren Fall erst *sekundär*, auf Grund von Zeit- und Schallfarbenunterschieden, entsteht.

Man hat vielfach eine falsche Auffassung von dem Richtungshören, indem man es als eine dem binokulären Sehen entsprechende Funktion betrachtet. Diese Denkweise ist zwar anatomisch, aber nicht physiologisch richtig. Die Hauptfunktion des binokulären Sehens ist die Abstandslokalisierung, während das binaurale Hören

uns in erster Linie nur die egozentrische Richtungslokalisierung vermittelt, also ähnlich wie das nichtstereoskopische, monokuläre Sehen. Mit Recht können wir deshalb für die Bestimmung der Richtungshörschärfe analoge Untersuchungsmethoden wie für die Bestimmung der Sehschärfe anwenden.

Wir wissen, dass die Sehschärfe durch den kleinsten Winkel definiert wird, unter welchem zwei optische Punkte noch gesondert erkannt werden. Für die Bestimmung der Richtungshörschärfe müssen wir entsprechend zwei akustische Punkte, d.h. zwei schallerzeugende Körper von kleiner Dimension, deren Abstand variierbar ist, als Beobachtungsobjekte wählen. Wegen der Natur des Gehörsinns ist es vorteilhafter, die beiden Schallreize *sukzessiv* einwirken zu lassen, da bei simultaner Darbietung besonders die periodischen Schallvorgänge leicht interferieren können. Ist der Winkelabstand der beiden Schallquellen sehr klein, so verschmelzen die beiden Richtungsempfindungen miteinander; wird der Abstand dann allmählich vergrößert, so ergibt sich der kleinste Winkel, unter welchem wir die beiden Richtungen voneinander unterscheiden können. Durch diesen Winkel ist der Schwellenwert des Richtungshörens gemessen und eindeutig definiert.

#### *Bestimmungen der Richtungshörschwellen mittels Knackgeräuschen.*

Die als Schallreize dienenden Knackgeräusche wurden durch Schliessen und Öffnen eines Stromkreises erzeugt, der aus den früher beschriebenen Lautsprechern (s. S. 18) und einer Batterie von 12 V bestand. Das Schliessen und Öffnen wurde mit einem morse-schlüsselartigen Umschalter bewerkstelligt, mit dem man in beliebiger Reihenfolge erst dem einen und dann dem anderen Lautsprecher Stromstöße erteilen konnte. Die Lautsprecher lagen auf einem Gestell in 6 m Entfernung von der auf einem runden Schemel sitzenden Vp. Von der Skala, die auf das Gestell gezeichnet war, konnte man den Winkel, den die Lautsprecher mit der Vp. bildeten, direkt ablesen. Wurde der Winkel so gross, dass die Breite des Gestells nicht mehr ausreichte (bei Winkeln  $>15^\circ$ ), so konnte man das Gestell mit den Lautsprechern bis in eine Entfernung von 2 m an die Vp. heranbringen, und für diese kleineren Abstände besass das Gestell besondere Skalen. Die Verschiebungen der Lautsprecher wurden von einem Gehilfen besorgt; der Versuchsleiter bediente den Umschalterschlüssel und notierte die Ergebnisse.

Im Anfang setzte sich die Vp. so auf den Schemel, dass sich die Lautsprecher gerade vor ihr befanden. Der Winkel wurde so gross gewählt, dass es der Vp. leicht war, die beiden Schallrichtungen voneinander zu unterscheiden. Der Einheitlichkeit halber war die Vp. aufgefordert, anzugeben, ob sie *den letzteren Knack rechts oder links von dem ersteren hörte*, und diese Angabe erfolgte durch Zeigen mit der Hand nach der entsprechenden Seite. Da die Vp. die winzigen Bewegungen der Lautsprechermembranen nicht sehen konnte, und da der Umschalter sich ausserhalb ihres Gesichtskreises befand, war es überflüssig, ihre Augen zu verdecken, und dadurch gestaltete sich das ganze Experimentieren viel angenehmer als bei einigen später zu beschreibenden Versuchen, bei denen infolge der anders gearteten Reizungsanordnung eine Verdeckung der Augen der Vp. unumgänglich war.

Nachdem die Vp. sich einigermaßen an die Versuchsanordnung gewöhnt hatte, wurden die Schallerzeuger dicht aneinander geschoben, so dass ihre Mittelpunkte in einem Winkel von etwa  $1^\circ$  zu der Vp. standen. In der Regel war die Vp. dann nicht mehr imstande, den Richtungsunterschied der Schallreize anzugeben, sondern hatte den Eindruck, dass sie von derselben Stelle herkämen. Der Winkelabstand wurde allmählich vergrössert, bis die Vp. die Signale fehlerlos lokalisieren konnte, und dieser Winkel wurde als Schwellenwinkel notiert. Dann drehte sich die Vp. um  $30^\circ$  nach rechts, und der Schwellenwinkel wurde in der gleichen Weise wie früher bestimmt. Dieser Winkel war in der Regel etwas grösser als in der  $0^\circ$ -Stellung. Danach folgten die Versuche bei  $60^\circ$ , wo sich die Schwelle als noch mehr erhöht erwies. In der Seitenrichtung ( $90^\circ$ ) war die Bestimmung am schwierigsten, da die Anzahl der Fehlschlüsse hier viel grösser war als in den anderen Richtungen, wo die Vp. meistens richtige oder unsichere, seltener fehlerhafte Urteile abgab. Dieser Umstand, der zuerst meine Verwunderung erregte, wird später (S. 68) seine natürliche Erklärung erhalten. Dann wurde die Schwelle bei  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  und  $180^\circ$  bestimmt. In der letztgenannten Stellung lagen die Schallquellen gerade hinten und waren die Schwellenwerte im allgemeinen von derselben Grösse wie in der  $0^\circ$ -Stellung. Die Schwellenbestimmungen wurden dann noch in den Stellungen  $210^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $300^\circ$  und  $330^\circ$  fortgesetzt, und die hierbei festgestellten Werte entsprachen annähernd den auf der anderen, symmetrischen Seite erhaltenen Ergebnissen. Auf diese Weise gewann man ein Bild über die Verteilung der Richtungs-hörschärfe in der *Horizontalebene*.

Je häufiger diese Versuche mit derselben Vp. angestellt wurden, desto kleiner wurden auch die Schwellenwerte. Dieser Umstand steht im Einklang mit den Beobachtungen von KLEMM (1920) und HALVERSON (1922) über den Einfluss der Übung auf die Richtungs-hörversuche.

Sämtliche in diesem Kapitel besprochenen Versuche sind mit zwei Versuchspersonen ausgeführt. Oft, zumal wenn etwas besonders Interessantes beobachtet wurde, nahm ich die Stelle der Vp. ein, um zu konstatieren, ob die gefundenen Werte auch für mich galten. Diese Versuche wurden aber nicht regelmässig ausgeführt, weshalb die auf mich bezüglichen Werte hier nicht berücksichtigt werden.

Bei einem Versuch mit der Vp. K.V. (nach kurzer Übung; Messgenauigkeit  $0.5^\circ$ ) wurden folgende Richtungshörschwellenwinkel erhalten:  $0^\circ\text{—}2^\circ$ ,  $30^\circ\text{—}3^\circ$ ,  $60^\circ\text{—}4^\circ$ ,  $90^\circ\text{—}16^\circ$ ,  $120^\circ\text{—}4^\circ$ ,  $150^\circ\text{—}3^\circ$ ,  $180^\circ\text{—}3^\circ$ ,  $210^\circ\text{—}3^\circ$ ,  $240^\circ\text{—}4^\circ$ ,  $270^\circ\text{—}20^\circ$ ,  $300^\circ\text{—}7^\circ$ ,  $330^\circ\text{—}4^\circ$ .

Die entsprechenden, etwas kleineren Werte bei der Vp. N.H. (nach langer Übung, Messgenauigkeit  $0.2^\circ$ ) sind aus der Abb. 12 ersichtlich. Die verschiedenen Radien bezeichnen die Stellung der Vp. in bezug auf die Schallquellen, und die radiale Entfernung der Ringpunkte vom Mittelpunkt ist ein relatives Mass des in dieser Richtung herrschenden Schwellenwinkels. Wir sehen, dass der Schwellenwinkel in den Richtungen gerade vorn und hinten nur  $1.2^\circ$  beträgt. In  $30^\circ$  Entfernung von dieser Medianrichtung liegt die Schwelle in allen 4 in Frage kommenden Stellungen ( $30^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $210^\circ$ ,  $330^\circ$ ) bei etwa  $1.5^\circ$ , in  $60^\circ$  Entfernung von der Mediane ( $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $300^\circ$ ) bei  $2\text{—}3^\circ$ , während sie in beiden Seitenrichtungen ( $90^\circ$ ,  $270^\circ$ )  $10\text{—}11^\circ$  beträgt. Aus Gründen, die auf Seite 68 dieser Abhandlung auseinandergesetzt werden, und auch deshalb, weil sich bei den Versuchen in der Seitenrichtung nur der eine Lautsprecher in der Ohrenachse befand, darf die letztgenannte Schwelle korrekterweise nicht nur durch einen Punkt, sondern muss durch 2 Punkte dargestellt werden, die um die Hälfte des Schwellenwinkels von der Ohrenachse entfernt liegen. Die Figur bleibt infolgedessen in beiden Seitenrichtungen offen.

Entsprechende Untersuchungen wurden auch in der *Frontalebene* ausgeführt, wobei dasselbe tischartige Gestell wie in den Hörschwellenversuchen (S. 24) zur Anwendung kam. Als Vorteil dieser Versuchsanordnung sei erwähnt, dass die Schwellenwinkel auch in Richtungen, die in normalen Verhältnissen gerade über dem Kopfe

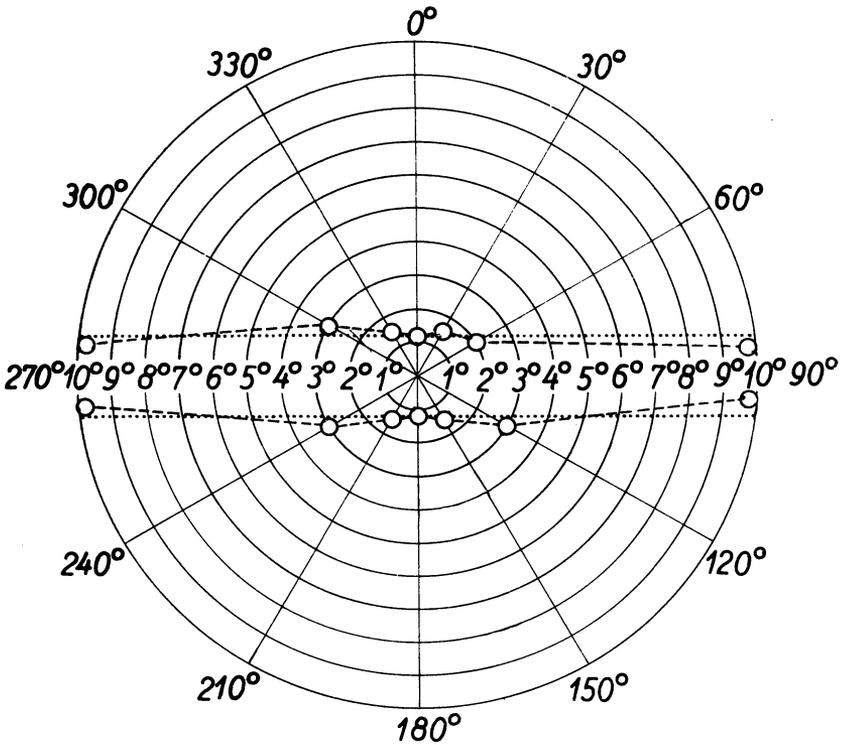


Abb. 12.

Richtungshörschwellenwinkel bei Knackgeräuschen in der Horizontalebene.

(0°) und gerade unter den Füßen (180°) liegen, bequem gemessen werden konnten.

Bei der Vp. K.V. (nach kurzer Übung, Messgenauigkeit 0.5°) wurden folgende Resultate erhalten: 0°—2°, 30°—4°, 60°—5°, 90°—20°, 120°—7°, 150°—4°, 180°—1°, 210°—2°, 240°—3°, 270°—17°, 300°—10°, 330°—4°.

Die entsprechenden Werte bei der Vp. N.H. gibt die Abb. 13 wieder, die nach dem gleichen Prinzip wie die vorige gezeichnet ist.

Es wurde auch versucht, diese Methode zur Bestimmung der Richtungshörschwellen in der *Medianebene* anzuwenden. Ich merkte aber bald, wie auch zu erwarten stand, dass die Schwellenwinkel sehr gross (>30°) und unbestimmt waren, so dass die Methode sich hier als unzweckmässig erwies.

Betrachten wir jetzt die Abb. 12 und 13, die, wie schon erwähnt, die Richtungshörschärfe, in Winkelgraden gemessen, in der Horizon-

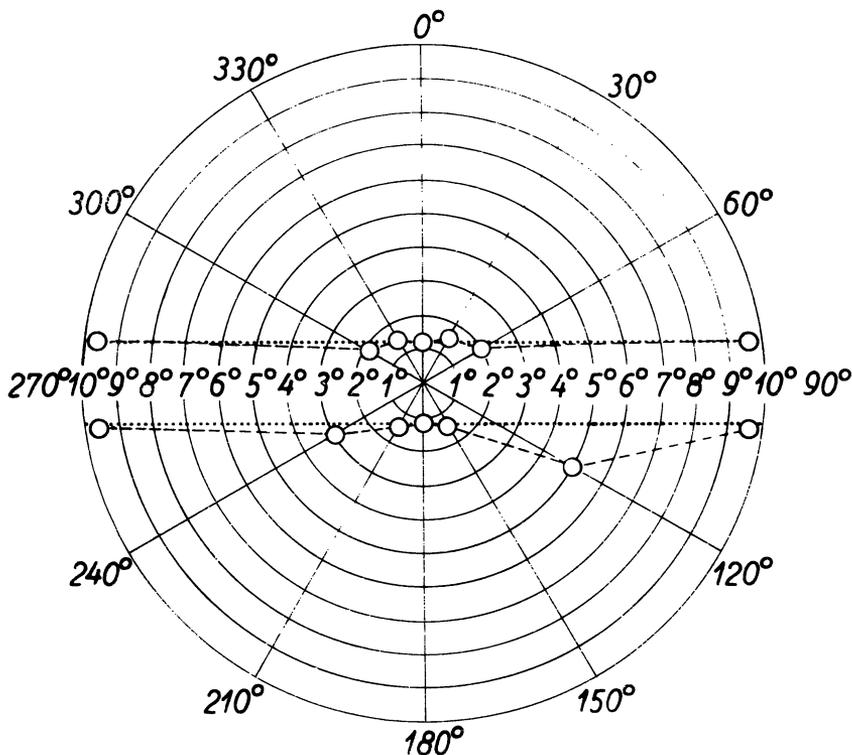


Abb. 13.

Richtungshörschwellenwinkel bei Knackgeräuschen in der Frontalebene.

tal- und in der Frontalebene darstellen. Wir sehen auf den ersten Blick, dass die Schwellenwerte in »entsprechenden« Richtungen beider Ebenen auffallend übereinstimmen. Es ist selbstverständlich, dass dieser Gleichheit der Schwellenwerte irgendeine Gleichheit in der Reizbildung zu Grunde liegen muss. Was die Horizontal- und die Frontalebene betrifft, so stehen sie beide senkrecht zu der Medianebene. Die Richtungen 90° und 270°, die sich in der Ohrenachse befinden, sind in den beiden Ebenen gleich. Die Richtungen 30°, 150°, 210° und 330° liegen, von der Vp. aus betrachtet, in den beiden Ebenen je 30°, die Richtungen 60°, 120°, 240° und 300° je 60° von der Medianebene entfernt.

Wir wollen nun die erhaltenen Resultate vom Standpunkt der *Zeittheorie* betrachten. Die Gleichheit der Schwellenwerte in der Horizontal- und in der Frontalebene stände dann in guter Über-

einstimmung mit dieser Theorie, da der Zeitunterschied nur von dem Winkel zwischen Schallrichtung und Mediane, nicht aber von der Ebene abhängig ist, in der sich die Schallquelle befindet. Wir wissen von früher her, dass der Weglängenunterschied

$$\Delta s = k \sin \alpha \dots\dots\dots (1)$$

worin  $\alpha$  den Winkel von der Mediane bedeutet und  $k = 21$  cm ist (vgl. S. 13). Wird der Weglängenunterschied in cm ausgedrückt, so ist der Zeitunterschied  $\Delta t = \frac{\Delta s}{34000}$  sek, wenn die Schallgeschwindigkeit 34000 cm in der Sek. beträgt.

Wir wollen annehmen, dass eine entfernte Schallquelle mit konstanter Winkelgeschwindigkeit längs eines Kreises, in dessen Mittelpunkt sich der Kopf der Vp. befindet, von der Mediane (=  $0^\circ$ ) bis in die Richtung  $90^\circ$  bewegt wird. Bei einem beliebigen Winkel  $\alpha$  ist also der Weglängenunterschied =  $k \sin \alpha$ . Die Zuwachsgeschwindigkeit des Weglängenunterschieds folgt der Differentialgleichung:

$$\frac{ds}{dt} = \cos \alpha \dots\dots\dots (2)$$

und der gleichen Weglängenzuwachsdifferenzen entsprechende Winkelabstand folgt der Gleichung:

$$\frac{dt}{ds} = \sec \alpha \dots\dots\dots (3)$$

Nehmen wir an, dass für das Entstehen einer Richtungsrichtungsschwellenempfindung, unabhängig von der Grundrichtung, immer gleich grosse Differenzen ( $\tau$ ) in den wirksamen Zeitunterschieden ( $\Delta t_1, \Delta t_2$ ) des ersten und des zweiten Schallreizes notwendig sind, und dass es gleichgültig ist, welcher von den beiden grösser ist, d.h.  $\Delta t_1 - \Delta t_2 = \pm \tau$ , wobei das Vorzeichen von  $\tau$  im folgenden wegen seiner Bedeutungslosigkeit weggelassen wird. Ist der erste, sich auf die Mediane begrenzende Schwellenwinkel =  $\alpha_0$ , so ist der absolute Wert von  $\tau$  nach der Gleichung (1):

$$\tau = \frac{21 \sin \alpha_0}{34000} = 0.00062 \sin \alpha_0 \text{ sek.}$$

Der *Richtungshörschwellenwinkel*  $\beta$  ist, wie oben gesagt, in der Mediane =  $\alpha_0$ . Er vergrössert sich dann mit der Vergrösserung des Grundwinkels  $\alpha$  gemäss der Formel (3), wie folgt:

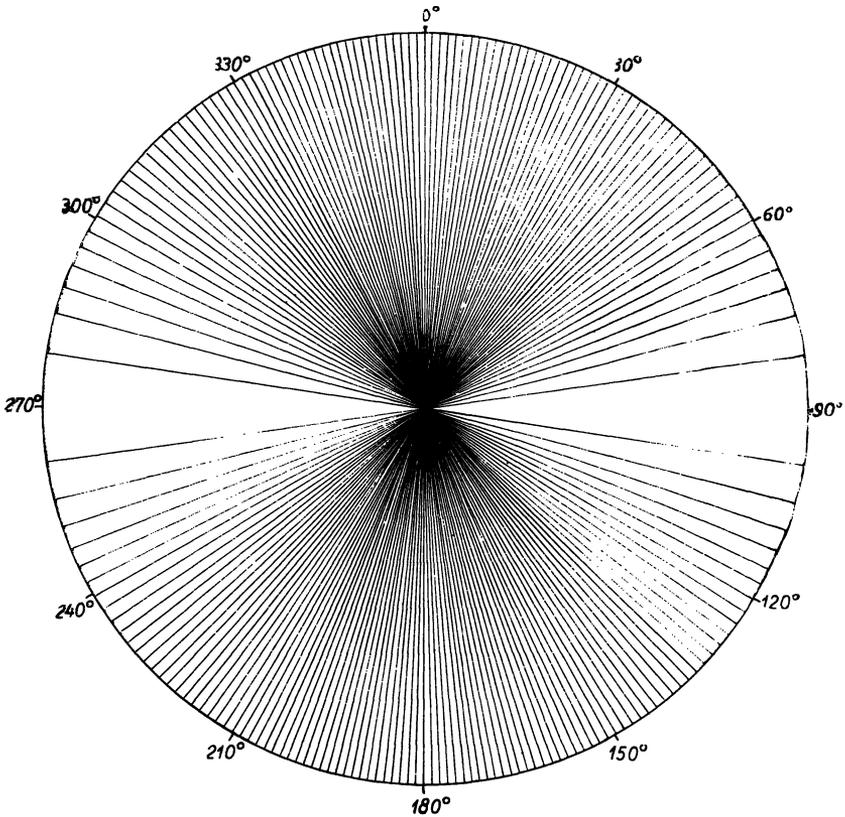


Abb. 14.

Die Verteilung der eben unterscheidbaren Hörrichtungen gemäss der Formel (5) (Medianschwellenwinkel  $1.2^\circ$ ).

$$\beta = \alpha_0 \sec \alpha \dots\dots\dots (4)$$

Betrachten wir die Abb. 12 und 13, so sehen wir, dass der Schwellenwinkel in der Mediane etwa  $1.2^\circ$  beträgt. Setzen wir demnach  $\alpha_0 = 1.2^\circ$ , so stellen die beiden punktierten Linien die nach der Formel (4) berechneten Werte von  $\beta$  graphisch dar. Es ist leicht zu ersehen, dass die empirisch bestimmten, mit Kreispunkten und gestrichelten Linien bezeichneten Werte den theoretischen sehr nahe stehen. Meines Erachtens ist diese Übereinstimmung von Theorie und Empirie ein schöner Beweis für die Gültigkeit der Zeittheorie.

UNIVERSITÄT ZÜRICH  
BIBLIOTHEK

Die Anzahl aller voneinander unterscheidbaren Richtungen einer Quadrante (z.B.  $0^\circ$ — $90^\circ$ ) ergibt sich aus der Gleichung:

$$n = \operatorname{cosec} \alpha_0 \dots \dots \dots (5)$$

*Beweis.* Da nach der Voraussetzung alle Werte von  $\tau$  gleich sind, und da der (Gesamt)Zeitunterschied in der Richtung  $90^\circ$  gleich  $\frac{k \cdot \sin 90^\circ}{34000} = \frac{k}{34000}$  =  $n \cdot \tau$  ist, wobei  $\tau = \frac{k \cdot \sin \alpha_0}{34000}$ , so erhält man:  $n \cdot \frac{k \sin \alpha_0}{34000} = \frac{k}{34000} \therefore n = \frac{1}{\sin \alpha_0}$  =  $\operatorname{cosec} \alpha_0$ .

Es würden also *innerhalb* eines mit dem einen Schenkel an die Mediane grenzenden *Raumwinkels*  $\alpha$ , vorausgesetzt, dass  $\alpha < 90^\circ$ ,  $n \sin \alpha = \sin \alpha \operatorname{cosec} \alpha_0 = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0}$  voneinander unterscheidbare Richtungen fallen. Hieraus (weil  $\sin 30^\circ = 1/2$ ) folgt auch, dass von allen unterscheidbaren Richtungen eines Quadranten die Hälfte dem medianen Raumsektor von  $30^\circ$  angehört.

Die Abb. 14 veranschaulicht die Anzahl der eben unterscheidbaren Richtungen, wenn  $\alpha_0 = 1.2^\circ$ . Nach der Formel (5) ergibt sich dann  $n = 47.75$ . *Es ist also einer Vp., die in der Mediane eine Richtungshörschärfe von  $1.2^\circ$  hat, das Unterscheiden von etwa 48 Richtungen zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  möglich, von denen etwa 24 auf den medianen Sektor von  $30^\circ$  entfallen.*

Wie auch theoretisch zu erwarten ist, scheint das Richtungs-hören auf Grund dieser Untersuchungen beinahe ebenso genau in der Horizontal- wie in der Frontalebene zu sein. Dies steht in Widerspruch zu den Beobachtungen von AGGAZZOTTI (1921), der die Schallokalisation nur in der Horizontalebene als gut anerkennt.

Wir werden auf diese Fragen später (S. 68) nochmals zurückkommen.

#### *Versuche mit einseitigem Ohrverschluss.*

Bei diesen Versuchen, die sonst in gleicher Weise wie die vorigen ausgeführt wurden, wurde der eine Gehörgang sorgfältig mit Ohropax verschlossen. Die Resultate (Vp. N.H.) sind aus der folgenden Tabelle ersichtlich (die in den Abb. 12 und 13 mitgeteilten bei zwei-ohrigem Hören erhaltenen Werte sind vergleichshalber auch hier angegeben; bei  $270^\circ$  ist das verstopfte Ohr den Schallquellen zugewandt):

Tabelle 4.

Einfallswinkel	Horizontalebene		Frontalebene	
	Zweiohrig	Eins. verschl.	Zweiohrig	Eins. verschl.
0°	1.2°	5°	1.2°	6°
30°	1.5°	8°	1.5°	8°
60°	2°	8°	2°	18°
90°	10°	20°	15°	18°
120°	3°	24°	5°	14°
150°	1.5°	14°	1.5°	14°
180°	1.2°	8°	1.2°	7°
210°	1.5°	8°	1.5°	10°
240°	3°	24°	3°	35°
270°	11°	48°	15°	48°
300°	3°	18°	2°	30°
330°	1.5°	12°	1.5°	8°

Aus der Tabelle ersehen wir, dass der einseitige Ohrverschluss eine bedeutende Herabsetzung der Richtungshörschärfe bewirkt hat und zwar am meisten in den Richtungen auf der Seite des verschlossenen Ohres. Ein derartiger Ohrverschluss hebt jedoch die Hörfunktion des verschlossenen Ohres niemals vollkommen auf, und besonders die niedrigen Frequenzen dringen trotz aller Massnahmen in das Ohr hinein, so dass die binaurale Wirkung nicht ganz ausgeschlossen wird. Man sieht ja auch in denjenigen Kolumnen, die die Schwellenwinkel bei einseitigem Ohrverschluss darstellen, die kleinsten Schwellen gerade vorn und hinten, während die Schwellenwinkel in der Richtung des besser hörenden Ohres 3—4 mal grösser als die erstgenannten sind. Nur ein Rest des binauralen Hörens könnte diesen Umstand erklären. Für diese Annahme sprechen auch die Beobachtungen von PEREKALIN (1930), nach denen der einseitige Ohrverschluss die Lokalisation um so mehr beeinträchtigt, je wirksamer er ist. Durch die Untersuchungen von RAUCH (1922) ist bekannt geworden, dass einseitig Taube fast immer falsch lokalisieren. Es kann somit als bewiesen gelten, dass keine nennenswerte monotische Schallokalisation existiert. Diese Ergebnisse stehen also in Widerspruch zu denjenigen von BRUNZLOW (s. S. 8), der die monotische Schallokalisation als Element unseres Richtungshörens betrachtet.

#### Über den Einfluss der »Knackschärfe«.

Bei der Vp. N. H. wurden im Zusammenhang mit den auf S. 43 geschilderten Untersuchungen Versuche angestellt, um zu ent-

scheiden, in welchem Masse die Richtungshörschärfe von der »Schärfe« der Knackgeräusche abhängig ist. Durch Parallelschalten eines  $0.05 \mu$  F Kondensators in den Lautsprecherkreis wurde die Schallfarbe der Knackgeräusche infolge der Abrundung der Stromstösse dunkler und etwas schwächer; durch Vergrössern der Batteriespannung wurde der Knack auf ungefähr dasselbe Stärkeniveau wie in den früheren Versuchen eingestellt. Es zeigte sich, dass die Schwellenwinkel bei dunklerer Schallfarbe etwa um 50—60 % grösser waren als bei scharfen Knackgeräuschen. Diese Beobachtung bestätigt die auf S. 39 ausgesprochene Annahme über die Bedeutung der höheren Geräuschkomponenten als »Zeitmarken« beim Richtungsurteil.

#### *Über den Einfluss der Ein- und Ausschwingzeit.*

Einige Forscher (LACHMUND 1921, PEREKALIN 1930 u.a.) haben gefunden, dass beim Experimentieren mit Tönen Beginn und Ende für das Richtungshören massgebend sind, und dass bei einem gleichmässigen Ton die Richtung fast durchweg überhaupt nicht oder falsch angegeben wird. Da bisher keine Untersuchungen über den Einfluss der Ein- und Ausschwingzeit auf die Richtungshörschärfe vorliegen, hat es sich als nötig erwiesen, diesen Umstand einer näheren Betrachtung zu unterziehen.

Wir wollen zunächst betrachten, welche Vorgänge sich am Anfang und Ende eines Tonsignals abspielen. Es ist weitgehend von der Beschaffenheit der Schallquelle abhängig, mit welcher Geschwindigkeit sie die Tonamplitude von 0 bis zu einem bestimmten Wert hinaufzuheben und wieder bis 0 herabzubringen vermag, d.h. wie kurz die Ein- und Ausschwingzeiten dieses Systems sind. Schallquellen, die in Resonanz mit dem von ihnen erzeugten Ton stehen (die meisten Musikinstrumente, Pfeifen usw.), haben eine verhältnismässig lange Ein- und Ausschwingzeit. Mit fremdgesteuerten Systemen, wie es z.B. die elektrischen Lautsprecher sind, verhält es sich anders, vorausgesetzt, dass ihre Eigenschwingungszahl nicht in der Nähe der angewandten Frequenzen liegt. Durch solche Systeme können fast momentane Ein- und Ausschwingvorgänge erzielt werden, da sie den ihnen gegebenen elektrischen Impulsen »sklavisch« gehorchen müssen. Wenden wir als Quelle der Schallenergie sinusoidale Wechselströme an, so können wir durch Schliessen und Öffnen des Stromkreises ein ausserordentlich steiles Ein- und Ausklingen des Tones erzielen.

Es ist natürlich sehr interessant, zu untersuchen, in welchem Masse die Ein- und Ausschwinggeschwindigkeit eines Tones die Richtungshörschärfe beeinflusst. Wir können einen elektrisch erzeugten Ton durch Einschalten eines veränderlichen Widerstandes in den Lautsprecherkreis mit einer bestimmten Schnelligkeit ein- und ausschwingen lassen. Für langsame Prozesse könnte man einen mechanisch drehbaren Widerstand oder ein Potentiometer benutzen; da uns aber die schnelleren Ein- und Ausschwingvorgänge am meisten interessieren, müssen wir uns einer trägheitslos und automatisch funktionierenden Vorrichtung bedienen.

Als solche habe ich die Elektronenröhre benutzt. Es ist bekannt, dass der innere Widerstand einer solchen Röhre von der Spannung des Gitters abhängig ist. Ist die Gitterspannung = 0, so besteht zwischen Anode und Kathode ein konstanter, von den Konstruktionsdaten der Röhre abhängiger Widerstand, wird aber die Gitterspannung allmählich nach der negativen Richtung hin verändert, so vergrössert sich der Widerstand im Anodenkreis, bis er bei einer gewissen negativen Spannung =  $\infty$  wird.

Die Negativierung des Gitters wird durch Laden einer zwischen Kathode und Gitter geschalteten Kapazität aus einer Batterie unter Zwischenschaltung eines Widerstandes zustande gebracht. Je grösser der Widerstand oder der Kondensator ist, umso längere Zeit vergeht, bis das Gitter hinreichend negativ geworden ist, und desto langsamer wächst der Widerstand im Anodenkreis. Entlädt man den Kondensator durch den Widerstand, so verschwindet die Negativität des Gitters mit einer Geschwindigkeit, die von der Grösse der Kapazität und des Widerstandes abhängt.

Dies ist der Fall, wenn eine Gleichspannung zwischen Anode und Kathode gekoppelt ist. Bekanntlich fliesst ja der Anodenstrom nur in einer Richtung, so dass bei Wechselfspannungen nur die eine Halbwelle die Röhre zu durchfliessen vermag. Da aber die Tonwiedergabe dadurch ganz verzerrt würde, ist es vorteilhaft, die beiden Halbwellen zu erhalten, und zu diesem Zweck habe ich in den Anodenkreis eine Batterie von 120 Volt seriengeschaltet, eine Spannungsquelle, die der Röhre einen Grundstrom erteilt, dem sich die Wechselströme überlagern können. Im unteren Teil der Röhrenkennlinie wird die Sinusform der Wechselströme etwas nichtlinear verzerrt. Diese Verzerrung lässt sich durch eine komplizierte Schaltung vermeiden, da aber meine Versuche nur qualitativ waren, habe ich darauf verzichtet.

Das Schliessen und Öffnen der Gitterspannungsbatterie wurde durch eine elektrisch getriebene Kontaktvorrichtung bewerkstelligt, die aus einem Walzenlamellenunterbrecher von LAPICQUE (hergestellt von BOULITTE) umgebaut worden war. Nach dem Schliessen wurde der Gitterkondensator durch einen Serienwiderstand geladen; nach dem Öffnen entlud sie sich durch einen Parallelwiderstand. Diese Widerstände wurden so bemessen, dass die Ein- und die Ausschwingzeit gleich gross wurden. Zu der Kontaktvorrichtung gehörte auch ein Umschalter, der während der »stillen« Zwischenzeit, d.h. bei voller negativer Ladung des Gitterkondensators, abwechselnd den einen oder den anderen

Lautsprecher in den Anodenkreis koppelte. Die Vp. empfand dann, wie der Ton in dem einen Lautsprecher answoll, stationär blieb und abschwoll, was sich nach kurzer Pause in dem anderen Lautsprecher wiederholte. Die Bestimmung der Schwellenwinkel erfolgte in üblicher Weise; es wurde jedoch nur der Winkel  $\alpha_0$  bestimmt (= der Richtungshörschwellenwinkel in der Mediane). Die Periode des Überganges von einem Lautsprecher zum anderen betrug 3 Sek. Die Eichung der verschiedenen Ein- und Ausschwingzeiten entsprechenden Kondensatoren wurde oszillographisch ausgeführt; die längste Ein- und Ausschwingzeit betrug 0.5''.

In der folgenden Tabelle 5 sind die Resultate der Vp. N. H. bei den Frequenzen 400, 800, 1600, 3200 und 6400 wiedergegeben.

*Tabelle 5.*

Ein- und Ausschwingzeit	Frequenz				
	400	800	1600	3200	6400
	Schwellenwinkel n				
0.0000''	1.5 <sup>c</sup>	1.5 <sup>c</sup>	1.8 <sup>o</sup>	1.6 <sup>c</sup>	1.5 <sup>o</sup>
0.0005''	1.5 <sup>c</sup>	1.8 <sup>c</sup>	2.0 <sup>c</sup>	2.0 <sup>c</sup>	3.0 <sup>o</sup>
0.001''	1.8 <sup>c</sup>	2.0 <sup>c</sup>	3.0 <sup>c</sup>	2.5 <sup>c</sup>	3.0 <sup>o</sup>
0.0025''	2.0 <sup>c</sup>	2.5 <sup>c</sup>	5.0 <sup>c</sup>	3.5 <sup>o</sup>	4.0 <sup>o</sup>
0.005''	2.5 <sup>c</sup>	3.0 <sup>c</sup>	10.0 <sup>c</sup>	5.0 <sup>c</sup>	6.0 <sup>o</sup>
0.01''	3.0 <sup>c</sup>	3.5 <sup>c</sup>	12.0 <sup>c</sup>	8.0 <sup>c</sup>	9.0 <sup>o</sup>
0.025''	3.0 <sup>c</sup>	5.0 <sup>c</sup>	12.0 <sup>c</sup>	8.0 <sup>o</sup>	9.0 <sup>o</sup>
0.05''	4.0 <sup>c</sup>	5.0 <sup>o</sup>	14.0 <sup>o</sup>	13.0 <sup>o</sup>	10.0 <sup>o</sup>
0.1''	5.0 <sup>o</sup>	5.0 <sup>c</sup>	16.0 <sup>c</sup>	14.0 <sup>c</sup>	14.0 <sup>o</sup>
0.25''	7.0 <sup>c</sup>	7.0 <sup>c</sup>	24.0 <sup>c</sup>	16.0 <sup>c</sup>	16.0 <sup>o</sup>
0.5''	14.0 <sup>o</sup>	8.0 <sup>c</sup>	25.0 <sup>c</sup>	24.0 <sup>c</sup>	20.0 <sup>o</sup>

Aus der Tabelle ersieht man, dass wenn die Ein- und Ausschwingzeiten annähernd logarithmisch, die Richtungshörschwellenwinkel etwa linear ansteigen. Wegen der Unvollkommenheit meiner Methodik fühle ich mich nicht berechtigt, weitere Schlüsse aus diesen Resultaten zu ziehen, da die nichtlinearen Verzerrungen bei dieser Versuchsanordnung einen beträchtlichen Einfluss auf die Ergebnisse ausüben können.

Ich habe schon früher erwähnt, dass wir für die Schallokalisation auf Grund der Zeitunterschiede zeitliche Diskontinuitäten des Reizschalles brauchen, und dass unser Richtungsurteil umso genauer ist, je schärfer diese Diskontinuitäten sind. An erster Stelle stehen hier natürlich das schnelle Einschalten bzw. Unterbrechen des Tones. Je langsamer das Ein- und Ausschwingen stattfindet, um so verschwommener werden diese »Zeitmarken« und umso höher liegt die Schwelle. Beim plötzlichen Ein- und Ausschalten entsteht

auch eine Knallwirkung, deren Stärke und Aperiodizität umso grösser ist, je schneller die Ein- und Ausschwingvorgänge sind. Solche aperiodischen (d.h. ein breites Frequenzband enthaltenden) Schallreize haben auch vom Standpunkt der Schallfarbentheorie Interesse. Sogar in den elektrischen Vorgängen der Cochlea und des Gehörnerven können sich, wie aus den Untersuchungen von DAVIS nebst seinen Mitarbeitern (1934) hervorgeht, entsprechende Ein- und Ausschalteffekte widerspiegeln; hierüber wird noch später ausführlicher berichtet.

### *Richtungshörversuche mit Tongemischen.*

Tongemische entstehen z.B. beim gleichzeitigen Einwirken zweier oder mehrerer Wechselströme von verschiedener Frequenz auf denselben Lautsprecher. Sind die beiden von zwei gleichzeitig einwirkenden Wechselströmen annähernd sinusoidal, so entstehen Schwebungen, deren Frequenz gleich dem Frequenzunterschied der beiden primären Wechselströme ist. Diese Schwebungen sind im Lautsprecher nur bis zu einer gewissen oberen Frequenzgrenze, die von der Natur der Primärtöne abhängig ist, getrennt zu hören; beträgt der Frequenzunterschied mehr als etwa 100 Hz, so ist ein objektiv nicht vorhandener Ton von der Höhe dieses Frequenzunterschiedes, der sog. Differenzton, hörbar. Natürlich hört man auch die beiden Primärtöne.

Durch zwei Sinusstromgeneratoren wurden Wechselströme erzeugt, die dann in beliebigen Mischverhältnissen durch zwei Potentiometer in den Anodenkreis des im vorigen Kapitel besprochenen Röhrenwiderstandes abgeleitet werden konnten. Die Funktion der Kontaktvorrichtung war dieselbe wie im vorigen Kapitel. Es wurde auch hier nur der Schwellenwinkel  $\alpha_0$  (= der Richtungshörschwellenwinkel in der Mediane) bestimmt.

Zuerst wurden die Versuche mit den Frequenzen 900 und 1500 ausgeführt. Beide Frequenzen wurden oszillographisch so geregelt, dass ihre Amplituden ungefähr gleich gross waren. Dann war der Differenzton von der Frequenz 600 deutlich zu hören. Die Richtungshörschwellenbestimmungen wurden bei Ein- und Ausschwingzeiten von 0 bis 0.5'' ausgeführt. Der Schwellenwinkel erwies sich als unabhängig von diesen Vorgängen und betrug immer ungefähr  $1.5^\circ$  (mit Variationen von  $0.3^\circ$ ). Bei jedem Primärtone wurden auch Kontrollversuche mit einer Ein- und Ausschwingzeit von 0.25''

angestellt; die Schwelle für die Frequenz 900 lag bei  $10^\circ$  und für 1500 bei  $8^\circ$  (siehe Tab. 5. S. 54).

In gleicher Weise wurde das Zusammenwirken der Frequenzen von 1900 und 2500 Hz untersucht. Bei einem solchen Tongemisch wurde als Mittelwert der Schwelle, unabhängig von den Ein- und Ausschwingzeiten,  $1.9^\circ$  (Streuung der einzelnen Werte  $0.3^\circ$ ) erhalten. Wenn die Ein- und Ausschwingzeit  $0.25''$  betrug, lag die Schwelle für den Primärton 1900 Hz bei  $8.5^\circ$  und für 2500 Hz bei  $11^\circ$ .

Diese Resultate lassen erkennen, dass *die Schwellenwinkel bei den Tongemischen schon an sich so klein sind, dass die Ein- und Ausschwingvorgänge keine Rolle mehr spielen*. Dies ist aber leicht zu verstehen, wenn man weiss, dass bei einer solchen Überlagerung von zwei Tönen verschiedener Frequenz beständige Amplitudenvariationen vor sich gehen, und das Ein- und Ausschwingen so oft in der Sekunde stattfindet, wie die Frequenz des Differenztones angibt.

Aus diesen in der Literatur erstmaligen Untersuchungen geht der merkwürdige Umstand hervor, dass der *Richtungshörschwellenwinkel bei den Tongemischen trotz der illusorischen Kontinuität des Reizschalles klein ist*. Ich glaube, dass eine systematische Untersuchung dieser Umstände manche interessanten Ergebnisse über das Richtungshören dieser zu einer besonderen Klasse gehörenden, bisher verhältnismässig wenig untersuchten Schallreize ans Licht bringen würde.

#### *Richtungshörversuche mit Dauergeräuschen.*

Dauergeräusche wurden durch Verstärkung des »Ruhegeräusches« eines Kohlenkörnermikrophons erzeugt, das sich in einem schallisolierten Raum befand. Das auf diese Weise in den Lautsprechern entstandene Geräusch war sehr gleichmässig, sausend wie ein Wasserfall oder wie das Sicherheitsventil eines Dampfkessels. Das Geräusch wurde durch die früher geschilderte Kontaktvorrichtung mit einer Ein- und Ausschwingzeit von  $1''$  abwechselnd in beide Lautsprecher geleitet, und die Bestimmung der Schwellenwinkel in gleicher Weise wie bei früheren Versuchen ausgeführt.

Der Richtungshörschwellenwinkel  $\alpha_0$  (in der Mediane) betrug bei der Vp. N. H.  $1.5^\circ$ , bei einer anderen Vp.  $1.2^\circ$ . Diese kleinen Schwellenwerte sind ein schöner Beweis für die Stichhaltigkeit der auf S. 39 angeführten Gedanken über die Bedeutung der bei

den Geräuschen vorkommenden *zeitlichen Diskontinuitäten* beim Richtungshören. Es kann hier erwähnt werden, dass *beim Anhören eines solchen Geräusches der Richtungsinhalt beinahe mehr hervortritt als der eigentliche Schallinhalt*, während *beim Anhören eines Klanges der Richtungsinhalt schwach, der Schallinhalt dagegen stark erscheint*.

### *Richtungshörversuche mit Dauertönen.*

Aus der Tabelle auf S. 54, wo die Bedeutung der Ein- und Ausschwingzeit beim Richtungshören von Tönen behandelt worden ist, ersieht man, dass die Schwellenwinkel bei langen Ein- und Ausschwingzeiten gross (bis  $25^\circ$ ) sind. Wie schon an jener Stelle erwähnt worden ist, sind diese Versuche nur als qualitativ zu betrachten. Es wäre aber interessant zu wissen, wie gross die Schwellenwinkel bei Dauertönen sind, wenn sie möglichst obertonfrei und ohne nichtlineare Verzerrungen in die Lautsprecher geleitet werden. Zu diesem Zweck wurden die Töne mit einem dreistufigen Oktavensieb »gereinigt« und durch zwei 10,000  $\Omega$  Lewcos-Potentiometer abwechselnd in je einen Lautsprecher geleitet. Die Potentiometer wurden dabei so langsam gedreht, dass sowohl die Ein- als auch die Ausschwingzeit etwa 2'' betrug. Die Versuche wurden bei den Frequenzen 400, 800, 1 600, 3 200 und 6 400 Hz angestellt und zwar in den Richtungen  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  der Horizontalebene. Es ergab sich, dass die Schwellenwinkel bei beiden Vpn (N. H. und K. V.) und allen untersuchten Frequenzen zwischen  $25^\circ$  und  $35^\circ$  variierten; in den Richtungen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  waren sie im allgemeinen kleiner ( $25^\circ$ — $30^\circ$ ) als in den Richtungen  $90^\circ$  und  $270^\circ$  ( $30^\circ$ — $35^\circ$ ).

Da die Lokalisation bei diesen Versuchen nur auf Grund der Phasen- und der Intensitätsunterschiede möglich ist, so erhellt aus diesen grossen Schwellenwerten, dass die genannten Faktoren bei der Schallokalisation im allgemeinen keine grosse Rolle spielen können. Betrachtet man diese Faktoren gesondert, so können die Phasenunterschiede nur bei den zwei erstgenannten Frequenzen in Frage kommen (vgl. S. 11). Bei den übrigen Frequenzen kann die erzielte ungenaue Lokalisation nur durch Intensitätsunterschiede möglich sein.

*Versuche über die Bedeutung der Phasenunterschiede  
beim Richtungshören.*

Unter natürlichen Verhältnissen entstehen die Phasenunterschiede immer zusammen mit den Intensitätsunterschieden. Künstlich ist es aber möglich, die ersteren z.B. durch Anwendung von Teleskopröhren, schwebenden Stimmgabeln oder elektrischen Schwingungskreisen rein zu erhalten. Bei meinen Versuchen habe ich die beiden letzteren Hilfsmittel angewandt. Ich werde zunächst die mit *elektrischen Methoden* ausgeführten Versuche beschreiben.

Zwei Sinusstromgeneratoren waren auf dieselbe Frequenz abgestimmt. Der Ausgangskreis der beiden stand durch Frequenzfilter und Potentiometer mit je einem Kopfhörer in Verbindung. Es wurde darauf geachtet, dass die Kopfhörer gleichsinnig gekoppelt waren, d.h. dass gleichnamige Stromänderungen auch gleichnamige Membranbewegungen zur Folge hatten. Beide Ausgangskreise wurden ferner mit je einem Kathodenstrahloszillographen verbunden, und das gemeinsame gleichzeitige »Umkippen« der Kathodenstrahlen wurde durch das Kippgerät zustande gebracht, das seine Synchronisierung aus dem einen Sinusstromgenerator erhielt. War die Frequenz der beiden Sinusströme genau dieselbe, so entstand auf der fluoreszierenden Fläche der beiden Oszillographen eine stehende Sinuskurve. Wurden die Generatoren etwas verstimmt, so stand die leuchtende Figur in der Röhre, deren Sinusgenerator das Kippgerät synchronisierte, still, während sie sich in der anderen Röhre entweder vorwärts oder rückwärts schlängelte, je nachdem, ob die Frequenz dieser Seite grösser oder kleiner war als die der anderen Seite. In einem bestimmten Moment hatten beide Figuren dieselbe Phase; dann vergrösserte sich der Phasenunterschied allmählich bis  $180^\circ$ , um sich wieder bis  $0^\circ$  zu verkleinern. Mit Hilfe der Potentiometer wurde die Lautstärke der beiden Kopfhörer im Sukzessivvergleich auf dasselbe Niveau gebracht. Dieselben Phasenunterschiede, die man an den Oszillographen wahrnehmen kann, bestehen auch zwischen den Kopfhörern. Davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man die beiden Kopfhörer auf den Tisch stellt. Man hört, wie der von den beiden Kopfhörern gemeinsam erzeugte Ton bei der oszillographischen Phasengleichheit am stärksten ist, während er bei der darauffolgenden des Phasenunterschiedes verblasst und bei der Phasenlage von  $180^\circ$  völlig verschwindet.

Werden die Kopfhörer, zwischen denen also ein kontinuierlicher Phasenwechsel stattfindet, an die Ohren gebracht, so verschwindet diese Schwebung vollständig. Auch wenn man die Verstimmung noch vergrössert, so dass die Phasenverschiebungen schnell erfolgen, kann man keine Schwebungen hören, ausgenommen in dem Falle, dass der Ton sehr stark gemacht wird. Die dann entstehenden, sehr undeutlich hörbaren Schwebungen beruhen wohl zum grössten Teil auf dem Einfluss der Gewebe (Knochen-)leitung.

Von drei Beobachtern war ich der einzige, der überhaupt etwas

von den lokalisatorischen Einflüssen der Phasenunterschiede hören konnte. Die zwei anderen gaben an, dass sie den Ton gleichmässig und gleich stark in beiden Ohren ohne irgendwelche Verschiebungen von einer Seite zur anderen empfanden. Das ganze Frequenzgebiet von 200 bis 2000 Hz wurde untersucht; das Resultat blieb aber immer dasselbe. Ich selbst konnte in dem Frequenzgebiet von 200—1200 Hz eine sehr verschwommene »Drehtonempfindung« erhalten. Die Kino-Aufnahme-Kamera stand bereit, um die den verschiedenen Richtungsempfindungen entsprechenden Phasenverhältnisse zu »fixieren«; es stellte sich aber bald heraus, dass es unmöglich war, die Schallrichtung in irgendeiner Weise zu definieren. Auch die Anzahl der Fehlschlüsse zwischen rechts und links war ebenso gross wie diejenige der richtigen Urteile.

Zu ähnlichen Ergebnissen wie ich ist auch BANISTER (1925) gekommen. Seine Untersuchungsmethode hat auch eine gewisse Ähnlichkeit mit der meinigen. Er hebt hervor, dass bei diesen Versuchen überraschend viele Fehlurteile zwischen rechts und links vorkommen. Nach BANISTER können Töne bis 1400 Hz auf Grund der Phasenunterschiede in einer undeutlich bestimmten Seitenrichtung gehört werden, wobei aber die Autosuggestion infolge von theoretischer Erwartung eine grosse Rolle spielt.

Auf Grund der vorgelegten Tatsachen dürfte es keinem Zweifel unterliegen, dass den *Phasenunterschieden keine grössere Bedeutung bei der Lokalisation des Schalles zukommt*. Es gibt aber Untersuchungen, u. a. von HALVERSON (1922), STEWART (1922) und VALENTINE (1927), nach welchen die Bedeutung der Phasenunterschiede beim Richtungshören offenbar wäre. Da erhebt sich die Frage, ob die von diesen Forschern angewandten Untersuchungsmethoden ganz einwandfrei gewesen sind. Die von ihnen angewandten elektrischen Stimmgabeln erzeugen ausser dem Primärton auch einige harmonische Obertöne und ausserdem bei jeder Periode ein kurzes Geräusch, das teils infolge mechanischer Erschütterung teils durch die Funkenbildung in der Kontaktvorrichtung entsteht. Diese Geräusche können auf Grund der Zeitunterschiede die Schallokalisation wesentlich erleichtern und die von den genannten Autoren gefundenen Gesetzmässigkeiten erklären.

Für die weitere Begründung meines Standpunktes machte ich folgende Versuche: Zwei langsam schwebende gewöhnliche Stimmgabeln von  $c^1$  (= 258.6 Hz) wurden, eine auf jeder Seite, in etwa 0.5 m Entfernung von den Ohren in die Ohrenachsenrichtung

gebracht. Bei dieser Anordnung konnte jede Vp. einen sich abwechselnd von der einen nach der anderen Seite bewegenden Ton (»Drehton») hören. Das beruht aber nicht auf dem Phasenunterschied allein, sondern bei dieser Versuchsanordnung, wo die auf der einen Seite befindliche Stimmgabel auch auf das entgegengesetzte Ohr wirken kann, entstehen kleine Intensitätsunterschiede, deren Wirkungsrichtung sich im Takt der Schwebungsfrequenz ändert. Wurden dagegen die Resonanzkästen der schwebenden Stimmgabeln mit ihren offenen Enden auf die Ohren aufgesetzt, so dass die Ohrmuscheln sich teilweise innerhalb dieser Kästen befanden, so übte jede Stimmgabel ihre Wirkung fast ausschliesslich auf ihr eigenes Ohr aus. Dies hatte zur Folge, dass der soeben besprochene »Drehton» völlig verschwand, obwohl die Wirkung des Phasenunterschieds unverändert weiter bestand. Diese letztgenannten Versuche wurden mit 57 normalhörigen Versuchspersonen (Studenten im Alter von 20—25 Jahren) ausgeführt. Von diesen hörten 52 weder Drehtöne noch dichotische Schwebungen; die übrigen 5 teilten mit, dass sie einen sehr undeutlichen Drehton wahrgenommen hatten. Da die Frequenz der Stimmgabeln vom Standpunkt der Phasentheorie zum optimalen Gebiet gehört, spricht dies Ergebnis gegen die Bedeutung der Phasenunterschiede beim Richtungshören.

*Versuche über den Raumeindruck, über die Lokalisationsgenauigkeit sowie über die Bedeutung der Zeit- und Intensitätsunterschiede bei binaural-elektrischer Schallübertragung.*

In den vorbereitenden Versuchen, die, wie schon früher gesagt, im Hause des Finnischen Rundfunks ausgeführt wurden, wandte ich meine Aufmerksamkeit hauptsächlich den qualitativen Verschiedenheiten zwischen dem monauralen und dem binauralen Schalleindruck zu. Hören wir z.B. einer Rundfunkaufführung in gewöhnlicher Weise mit Kopfhörern zu, so erhalten beide Ohren eine annähernd ähnliche Reizung, und obwohl wir mit beiden Ohren hören, fehlen uns doch die beim natürlichen Hören vorkommenden charakteristischen Unterschiede zwischen den Schallreizen des einen und des anderen Ohres, und das Hören bleibt jedenfalls »monaural», ihm fehlt die Raumwirkung; man empfindet das ganze »flach» wie ein Bild, dem trotz der Betrachtung mit beiden Augen die infolge der Querdisparation der Netzhautbilder entstehende Tiefenwirkung fehlt. Die wichtigste solcher »Disparationen» beim Richtungshören

ist der binaurale Zeitunterschied, der auch bei elektrischer Schallübertragung zu erhalten ist, wenn man zwei Mikrophone in etwa 21 cm Entfernung voneinander stellt und jedes mit einem Kopfhörer verbindet. Wenn auch die so erhaltene »binaurale« Wirkung die in der Natur vorkommende nicht völlig ersetzen kann — fehlen ihr doch die Schallschatten- usw. Wirkungen des Kopfes und der äusseren Ohren — so kann man bei dieser Anordnung dennoch durchaus offenbare Unterschiede in der Natur des monauralen und des binauralen Hörens feststellen.

Zu diesen Versuchen wurden zwei Kondensatormikrophone von Telefunken angewandt, deren gegenseitigen Abstand man beliebig variieren konnte. Nach der Verstärkung wurden beide Ausgangskreise mit einer Umschaltevorrichtung verbunden und zwar so, dass man durch diese Vorrichtung die Aufführungen im Studio entweder in gewöhnlicher Weise, also »monaural«, oder getrennt, »binaural«, abhören konnte, wobei das Umschalten von dem monauralen System in das binaurale im Handumdrehen bewerkstelligt wurde. Bei monauraler Darbietung war der Effekt derselbe wie beim gewöhnlichen Rundfunkhören — die Orchestermusik wurde im Innern des Kopfes verspürt und konnte nicht nach aussen projiziert werden. Wurde das System mittels des Umschalters binaural gemacht, so trat eine erstaunliche Veränderung ein: das Orchester »verbreitete sich« um den Beobachter herum, die Musik spielte klangvoll, und es war leicht, die verschiedenen Musikinstrumente voneinander zu unterscheiden; es schien, als ob man die Aufmerksamkeit auf ein Instrument richten könnte, wobei die anderen »gedämpft« wurden. Viele musikalisch geschulten Personen (Kapellmeister, Virtuosen, Musiker) waren als Zuhörer bei diesen Versuchen zugegen, und die meisten äusserten ihre Verwunderung über die naturgemässe Klangfülle und den Wunsch, dass dies System einmal verallgemeinert werden möchte.

Über die Unterschiede zwischen dem monauralen und dem binauralen Hören haben u.a. v. HORNBOSTEL (1923), AGGAZZOTTI (1929) und HARTRIDGE (1934) Untersuchungen ausgeführt. Der erstgenannte Autor sagt, meines Erachtens sehr zutreffend: »Zwei-ohrige Schälle klingen voller — nicht eigentlich stärker — als einohrige. Jene haben etwas Hallendes, das diesen fehlt«.

Es war auch interessant zu beobachten, dass die binaurale Wirkung am natürlichsten war, wenn der Mikrophonabstand, der v. HORNBOSTEL-WERTHEIMERSCHEN Konstante entsprechend, etwa 21 cm

betrug. Bei kleineren Mikrofonabständen erschienen die Instrumente mehr nach der Medianebe hin verschoben, während bei grösseren ( $> 50$  cm) die Empfindung eines übermässigen Echos auftrat.

Genauere Untersuchungen über die *Bedeutung der Weglängen* (= *Zeit*-)unterschiede fanden im Aufnahmerraum des Physiologischen Institutes statt. Dabei wurden die früher beschriebenen Kondensatormikrophone mit ihren turmartigen Vorverstärkern (s. S. 18) angewandt. Diese standen dicht nebeneinander auf einer Glasplatte, die wagrecht auf einem Gestell lag, das mit Millimetereinteilung versehen war. Zeitunterschiede zwischen den Mikrofonen wurden durch Verschieben des einen Mikrophons nach vorn und des anderen nach hinten erzielt. Die dabei entstehenden kleinen Intensitätsunterschiede wurden durch Potentiometer in den Endverstärkern ausgeglichen, und die optische Kontrolle erfolgte durch die beiden Kathodenstrahloszillographen. Als Schallreize wurden *Knackgeräusche* angewandt, die in gleicher Weise wie bei den Versuchen auf S. 43 erzeugt wurden. Die Vp., die sich im Analysierzimmer befand, bediente auch den Morseschlüssel zur Erzeugung der Reizschälle, die der Lautsprecher im Aufnahmerraum wiedergab. Der Gehilfe, der im Aufnahmerraum stand, führte die Verschiebungen der Mikrophone aus. Zu diesem Zweck erhielt er Instruktionen durch die Telephonverbindung zwischen dem Analysierzimmer und dem Aufnahmerraum.

Die Bestimmung des Schwellenweglängenunterschieds und des dementsprechenden »medianen« Schwellenwinkels  $\alpha_0$  geschah in folgender Weise: Zuerst wurden die beiden Mikrophone nebeneinander in gleiche Entfernung von dem Lautsprecher gestellt und danach ein Knacksignal gegeben. Dann verschob der Gehilfe das eine Mikrofon entweder vorwärts oder rückwärts, wonach das Signal wiederholt wurde. War der Mikrofonabstand genügend gross, so beobachtete die Vp., dass der letzte Knack auf die Seite des kürzeren Schallweges lokalisiert wurde, wobei der erste Knack die Medianebe markierte. Diese bei jedem Versuch wiederholte Markierung der Mediane war unbedingt nötig, weil es der Vp. bei diesen kleinen Schwellenwinkeln schwer fällt, zu entscheiden, ob sich der Schall rechts oder links von der (subjektiven) Mediane befindet (vgl. auch S. 41). Auf Grund meiner Versuche kann ich mich der Ansicht v. HORNOSTELS (1922), nach welcher es leicht gelingt, eine Richtung zu finden, wo der Schall »eben nicht mehr seitlich« erscheint, nicht anschliessen. Die Schwankungen der subjektiven Mediane betrogen

in diesen Versuchen bei einer und derselben Vp. 5—10°, wobei die Versuche so angeordnet wurden, dass der Gehilfe bei wiederholtem Knacken die Mikrophone langsam hin und her verschob, bis die Vp. angab, dass sie die Signale in der Medianebene hörte.

Bei den Versuchen, an denen ich als Beobachter teilnahm, wurde als *Schwellenweglängenunterschied 1.1 cm* (Durchschnittswert von 10 Versuchen) erhalten. Dies entspricht einem Schwellenwinkel von 3°. Obwohl dieser Wert grösser ist als der mit unbewaffneten Ohren erhaltene (1°—1.5°), so ist er doch überraschend klein, wenn man bedenkt, dass der *Zeitunterschied bei einem Winkel von 3° nur 0.000 03 Sek* beträgt. Die Wiedergabe eines so kleinen Zeitunterschieds ist von der Genauigkeit der Schallübertragungsgeräte besonders hinsichtlich der hohen Frequenzkomponente abhängig. Die gewöhnlichen Kopfhörer sind hinsichtlich ihrer Wiedergabe des ganzen Schallspektrums sehr begrenzt. Bei Frequenzen  $> 5000$  Hz nimmt ihre Wiedergabe beträchtlich ab, und die obere Frequenzgrenze liegt viel niedriger als die des menschlichen Ohres. Auch üben die Ausgleichsvorgänge und die verschiedenen Schwingungsformen bei solchen am Rande eingespannten Telephonmembranen, die u. a. von TRENDELENBURG (1930) untersucht worden sind, eine die Schallqualität verschlechternde Wirkung aus. Es wäre wohl möglich gewesen, durch Anwendung von Thermophonen oder piezoelektrischen Kopfhörern, welche die hierbei wirksamen höheren Frequenzen besser wiedergeben, kleinere Schwellenwinkel zu erhalten.

Ferner wollte ich wie manche früheren Autoren, u. a. v. HORNBOSTEL u. WERTHEIMER (1920), TRIMBLE (1929) untersuchen, ein wie grosser Weglängenunterschied erforderlich ist, damit die Knackgeräusche rein seitlich gehört werden. Wir wissen, dass derselbe nach v. HORNBOSTEL und WERTHEIMER (1920) 21 cm beträgt. Bei fortgesetztem Knacken liess ich den Gehilfen den Mikrophonabstand langsam vergrössern, bis das von der Mediane nach der Seite wandernde Schallbild in der Ohrenachsenrichtung erschien. Dies geschah bei einem Weglängenunterschied von etwa 22 cm (Variationsbreite 20.5—24 cm). Wurde der Weglängenunterschied noch vergrössert, so verhartete der Schall bis zu einem Weglängenunterschied von 45—50 cm in dieser Richtung; wurde der letztere noch darüber hinaus vergrössert, so tauchte ähnlich wie bei den Beobachtungen von KLEMM (1920), TRIMBLE (1929) in der entgegengesetzten Richtung ein zweites Schallbild auf, das bei fortgesetztem Vergrössern des Weglängenunterschieds immer stärker wurde.

Bei den in diesem Kapitel beschriebenen Versuchen projizierte ich die elektrisch vermittelten Schallrichtungswahrnehmungen anfänglich in die vordere Hälfte der Horizontalebene. Bald beobachtete ich aber, dass die Knacksignale, die in der Mediane vorn erschienen, plötzlich nach hinten »hinüberflogen«. Sobald ich mich von dem Vorurteil, dass die Signale in der Horizontalebene gehört werden müssten, befreit hatte, fand ein solcher spontaner Richtungswechsel nicht nur zwischen vorn und hinten statt, sondern »flog« der Schall, wenn die Schallreize in beiden Ohren ohne Zeitunterschied auftraten, bald nach oben, bald nach unten, und bald nach irgendeiner anderen Richtung der Medianebene.

Die Erklärung dieser Sachverhalts ist einfach. In der Natur sind alle Richtungen der Medianebene einander insofern gleichwertig, als sie alle dem Zeitunterschied 0 entsprechen. In Ermangelung eines Zeitunterschiedes, also wenn die Schallsignale die beiden Ohren gleichzeitig treffen, lokalisieren wir den Schall auch bei den oben besprochenen Versuchen in die Medianebene. Da es uns unnatürlich erscheinen würde, diesen Schall als gleichzeitig aus allen Richtungen der Medianebene kommend zu empfinden, »wählen« wir eine von diesen Richtungen. In der Natur wird diese Wahl öfters durch akzessorische Einflüsse erleichtert, da aber alle solche Einflüsse durch die Versuchsanordnung ausgeschlossen sind, wird die Wahl hier nur von zufälligen Umständen abhängig. Ein solcher Umstand ist das erwähnte Vorurteil, dass der Schall nur in der Horizontalebene gelegen sein könne; ein anderer ist der »Überdross« an einer Richtung in Ermangelung von diese Richtung charakterisierenden Einflüssen. Auf dem optischen Gebiet erscheint ein analoger »Überdross« beim Betrachten der bekannten Treppen- oder Würfelfigur, der die Perspektive fehlt.

So verhält es sich in der Medianebene. Dasselbe gilt aber auch für den Fall, dass wir bei einem geeigneten Weglängenunterschied eine Seitenlokalisation des Schalles erzielen. Bewirken wir z.B. eine Seitenabweichung von der Mediane um  $30^\circ$  (für den Weglängenunterschied ergab sich bei mir als Mittelwert von 6 Bestimmungen 10.4 cm; der Winkel wurde nur geschätzt), so findet für alle auf dieser Seite der Mediane gelegenen Richtungen, die, vom Mittelpunkt der Ohrenachse betrachtet, einen Winkel von  $30^\circ$  mit der Medianebene bilden, ein Richtungswechsel statt. Alle diese Richtungen liegen auf dem Mantel eines Kegels, dessen Spitze sich im Mittelpunkt der Ohrenachse befindet und dessen Achse mit der Ohren-

achse zusammenfällt. Je grösser der Weglängen (= Zeit-)unterschied wird, um so spitzer wird auch der Kegel, und in einem um so kleineren Bezirk findet der Richtungswechsel statt, bis der Kegel bei dem Weglängenunterschied 21 cm (bei meinen Versuchen 22 cm) mit seiner Achse (= Ohrenachse) zusammenfällt. *Die beiderseitigen Ohrenachsenrichtungen sind also die einzigen, die auf Grund der Zeitunterschiede eindeutig lokalisiert werden können.* Wie wir aber von früher her wissen, ist die *Richtungshörschärfe in diesen Gebieten am schwächsten.* — Diese Umstände werden im nächsten Kapitel erneuter Betrachtung unterzogen.

Die Wirkung des *Intensitätsunterschieds* der an beide Ohren geleiteten Schälle wurde durch Verstärkung des Schalles in dem einen Kopfhörer mittels des Potentiometers untersucht. War der Intensitätsunterschied ein 3—4-facher, so liess sich noch keine Seitenlokalisation des Schalles erzielen. Erst nachdem er auf das 5—10-fache gesteigert war, wurde der Schall auf Seiten der grösseren Intensität hörbar; es war aber zugleich auch ein Schall in der Medianebene (in der Richtung, der dem Zeitunterschied 0 entspricht) vorhanden. Man konnte jedoch den ersteren nicht nach aussen »projizieren«, sondern er erschien wie in dem Ohre selbst. Wurde ein kleiner Zeitunterschied durch Verlagerung der Mikrophone zustande gebracht, so liess sich die Seitenlokalisation auf Grund des Zeitunterschieds durch keinen entgegengerichteten Intensitätsunterschied ausgleichen, sondern es trat immer ein Doppelschall auf. Diese Ergebnisse über die Wirkung der Intensitätsunterschiede stehen in Einklang mit den Beobachtungen von STEWART (1920), LACHMUND (1921), HALVERSON (1922) und TRIMBLE (1929).

Um unser binaural-elektrisches Abhorchsystem *naturgetreuer* zu gestalten, wurden die beiden Mikrophone wie in den Versuchen auf S. 29 am Phantom angebracht. Die Versuchsanordnung war sonst die gleiche wie die früher beschriebene, jedoch mit der Ausnahme, dass wir die *Richtungshörschwellenwinkel* durch zwei Lautsprecher bestimmten, die in gleicher Weise wie bei den früher beschriebenen Schwellenwinkelbestimmungen *mit unbewaffneten Ohren* bedient wurden. Der in dieser Weise erhaltene Richtungshörschwellenwinkel in der Mediane  $\alpha_0$  betrug auch hier etwa 3°. Versuche über den Einfluss der Intensitätsunterschiede ergaben die gleichen Resultate wie oben (Schallverdoppelung usw.). Ebenso trat auch der gleiche Richtungswechsel des Schalles ein, der früher in diesem Kapitel besprochen worden ist. Die Schallstärke wurde in der Medianlage

des Phantoms im Kopfhörerkreis durch Sukzessivvergleich »äquilibriumiert«, danach wurden die Potentiometer unberührt gelassen, um die natürlichen Intensitäts (= Schallfarben-)unterschiede zu gewährleisten. Obwohl die Natürlichkeit der in dieser Weise gehörten Schälle erstaunlich war, konnte man doch nicht unterscheiden, ob eine im Aufnahmeraum sprechende Person sich vorn oder hinten befand (oben und unten wurden hier naturgemäss nicht in Betracht gezogen). Drehte der Beobachter den Kopf nach der Seite, so geschah etwas Unerwartetes: die sprechende Person wurde entweder in die Bewegung »mitgerissen« oder nach oben projiziert. Dies Phänomen dürfte wohl eine natürliche Erklärung haben: Die Kopfdrehung unter *normalen Verhältnissen* bewirkt immer, ausser in dem Falle, dass sich die Schallquelle in der Drehachse befindet, eine Änderung der spezifischen Richtungshörreize (Zeitunterschied, Schallfarbenunterschied); der vestibuläre und der cochleare Anteil entsprechen einander vollkommen, während dem vestibulären Reiz (Kopfdrehung) in *unserem Versuch* kein entsprechender cochlearer (Zeit- und Schallfarbenunterschied) angeschlossen ist. Daraus folgt, dass der Schall entweder nach oben bzw. unten lokalisiert oder in der Weise wahrgenommen wird, als ob er die Drehung des Kopfes mitmachte. Die Stimme einer sprechenden Person wird erfahrungsgemäss in der Nähe der Horizontalebene gehört; deshalb wird auch die letztgenannte Alternative bevorzugt.

Es ist bemerkenswert, dass man bei diesen Phantomversuchen nur den Seitenwinkel des Schalles wahrnehmen kann, während die genauere Projektion, d.h. die Entscheidung zwischen vorn, hinten, oben, unten usw. vollkommen fehlt. Man könnte denken, dass unsere Erfahrung über solche Lokalisationen sich auf unseren eigenen Kopf beschränkte, und dass uns der Phantomkopf diese zartesten Schallfarbenäusserungen »in fremder Sprache« wiedergäbe. Wir würden die Schallwiedergabefähigkeiten des Phantoms unterschätzen, wenn wir nicht später erfahren würden, dass auch beim Hören mit freien Ohren die zeitunterschied-äquivalenten Richtungen öfters miteinander verwechselt werden.

#### *Experimentelle Untersuchungen über die Eigenschaften unseres Hörraumes.*

Die früher besprochenen Untersuchungen beziehen sich hauptsächlich auf Faktoren, die eine Seitenlokalisierung des Schalles bewir-

ken. Es ist aber auch von Wichtigkeit zu wissen, wie diejenigen Richtungen voneinander unterschieden werden, die in gleichen Seitenwinkelabständen von der Mediane stehen. Erst nachdem wir die Richtungshörschärfe in diesen, sozusagen zeitunterschied-äquivalenten Richtungen ermittelt haben, können wir ein Bild von der Beschaffenheit unseres Hörraumes erlangen.

Um die verschiedenen Richtungen des Hörraumes genau angeben zu können, wurde aus 3 mm dickem galvanisierten Eisendraht ein kugelförmiges Gerüst von 160 cm Durchmesser gebaut. Es bestand aus ringförmigen Teilen, von denen die drei grössten in der Weise miteinander verbunden wurden, dass sie den drei Hauptebenen (Horizontal-, Frontal- und Mediane) entsprachen. Die Eisendrahtringe wurden an ihren Schnittpunkten aneinandergelötet. An beiden Seiten des die Mediane darstellenden Ringes wurde ein etwas kleinerer Ring so angebracht, dass er sich, vom Mittelpunkt der Kugel betrachtet, in  $30^\circ$  Entfernung von dem Medianring befand. In gleicher Weise wurde auch zu beiden Seiten des Horizontalringes in  $30^\circ$  Entfernung ein Ring angebracht. Nachdem 4 noch kleinere Ringe parallel zu den letzterwähnten in  $60^\circ$  Entfernung von der Median- und Horizontalebene festgelötet waren, war das Gerippe, das sich als sehr stabil erwies, fertig und wurde im Aufnahme-raum 30 cm über dem Fussboden an mehreren Drähten aufgehängt. Nun wurden die sich im untersten Teil des Gerüsts innerhalb des kleinen Ringes kreuzenden Teile des Frontal- und Medianringes herausgeschnitten, so dass die Vp. in das Gerippe hinein kriechen konnte. Die Vp. sass auf einem kleinen verstellbaren Schemel, und durch Heben und Senken desselben konnte der Kopf der Vp. in die Mitte der Kugel eingestellt werden. Das Gerippe war akustisch nicht nachteilig, da das Gesamtareal der Drähte nur 1.6 % von der ganzen Oberfläche der Kugel ausmachte. Die Schallreize wurden durch kleine »Kastagnetten« gegeben, wie sie in den Spielwarengeschäften erhältlich sind. Der schallerzeugende Teil derselben besteht aus einem länglichen Stahlblech. Drückt man mit dem Finger auf das freie Ende dieses Blechstücks, so schnellt das andere, etwas nach innen gebogene Ende plötzlich empor, indem es einen scharfen Knack erzeugt. Ein wichtiger Vorteil dieser Geräte ist, dass die Schallstrahlung wegen der Kleinheit der schallerzeugenden Fläche (etwa 1 qcm) sehr »punktförmig« ist, ein Umstand, der beim Arbeiten mit kurzen Abständen ins Gewicht fällt. Auch sind sie sehr einfach in der Anwendung.

Obschon der Hauptzweck dieser Versuche, wie erwähnt, die Untersuchung des Raumhörens in *zeitunterschied-äquivalenten Richtungen* war, wurde doch bei jeder Vp. (im ganzen 24 Vpn) der Richtungshörschwellenwinkel vorn ( $0^\circ$ ) und hinten ( $180^\circ$ ) in der Horizontalebene und oben ( $0^\circ$ ) in der Frontalebene bestimmt. Bei den 14 zuerst untersuchten Vpn wurden ausserdem Schwellenwinkelbestimmungen in den Richtungen  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $210^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $300^\circ$  und  $330^\circ$  von der Horizontalebene und in  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $300^\circ$  und  $330^\circ$  von der Frontalebene ausgeführt. Die Bestimmungen in den Richtungen  $150^\circ$ — $210^\circ$  von der Frontalebene wurden weggelassen, da sie sich bei dieser Versuchsanordnung, wo die Vp. eine sitzende Stellung einnahm, als schwer zugänglich erwiesen. Ebenso wurde auf die Bestimmungen in den Ohrenachsenrichtungen ( $90^\circ$  und  $270^\circ$  sowohl in der Horizontal- als in der Frontalebene) verzichtet, weil es einer ungeübten Vp. schwer fällt, in diesen Richtungen, wo auch eine geübte oft versagt (vgl. S. 39), exakte Antworten zu geben und zwar aus folgendem Grunde: Geben wir z.B. in der Horizontalebene zwei Schallreize, den einen in der Richtung  $90^\circ$  (rechts in der Ohrenachse) und den anderen in  $75^\circ$  (rechts ein wenig nach vorn), so verwechselt die Vp. den letzteren leicht mit der zeitunterschied-äquivalenten Richtung  $105^\circ$  (rechts ein wenig nach hinten) und gibt an, dass der letztere sich weiter nach hinten befindet als der erstere, obgleich es sich gerade umgekehrt verhält. Das gleiche gilt auch für die Frontalebene.

Die Bestimmungen der Richtungshörschwellenwinkel wurden in folgender Weise ausgeführt: Zuerst wurden 2—3 Knacksignale schnell nacheinander an einer Stelle des Kugelgerippes gegeben: dann führte der Versuchsleiter die »Kastagnette« nach der gewünschten Richtung, wo die Knacksignale wiederholt wurden. Der Winkelabstand der beiden Knacksignale wurde in üblicher Weise variiert, um den kleinsten eben unterscheidbaren Winkel, den Schwellenwinkel, zu erhalten, und die Grösse dieses Schwellenwinkels war durch das Gerippe leicht festzustellen.

Als Mittelwerte aus den Versuchen bei 14 Vpn ergaben sich folgende Schwellenwinkel:

In der Horizontalebene:  $0^\circ$ — $2.1^\circ$ ,  $30^\circ$ — $3.1^\circ$ ,  $60^\circ$ — $6.5^\circ$ ,  $120^\circ$ — $7.3^\circ$ ,  $150^\circ$ — $3.6^\circ$ ,  $180^\circ$ — $2.7^\circ$ ,  $210^\circ$ — $3.7^\circ$ ,  $240^\circ$ — $6.8^\circ$ ,  $300^\circ$ — $8.1^\circ$ ,  $330^\circ$ — $3.8^\circ$

In der Frontalebene:  $0^\circ$ — $2.5^\circ$ ,  $30^\circ$ — $3.8^\circ$ ,  $60^\circ$ — $9.6^\circ$ ,  $120^\circ$ — $11.0^\circ$ ,  $240^\circ$ — $9.8^\circ$ ,  $300^\circ$ — $10.5^\circ$ ,  $330^\circ$ — $3.5^\circ$ .

Man sieht, dass die Schwellenwinkel in der Mediane an allen

drei Stellen ( $0^\circ$  und  $180^\circ$  von der Horizontal-,  $0^\circ$  von der Frontalebene) annähernd gleich gross sind (Variationsbreite  $0.6^\circ$ , mittlerer Fehler 8 %). Dasselbe gilt auch für die in  $30^\circ$  Entfernung von der Medianebene gelegenen zeitunterschied-äquivalenten Richtungen  $30^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $210^\circ$  und  $330^\circ$  der Horizontalebene sowie  $30^\circ$  und  $330^\circ$  der Frontalebene (mittlerer Fehler 5.5 %). Grössere Unterschiede findet man zwischen den in  $60^\circ$  von der Medianebene befindlichen zeitunterschied-äquivalenten Richtungen  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$  und  $300^\circ$  in den beiden genannten Ebenen, und zwar so, dass der Mittelwert der Schwellenwinkel in der Frontalebene um 43 % höher ist als in der Horizontalebene. Der Unterschied beruht wahrscheinlich darauf, dass die schallreflektierende Wirkung der Schultern sich eben in diesen Richtungen der Frontalebene störend bemerkbar macht, während sie in den Richtungen  $30^\circ$  und  $330^\circ$  der Frontalebene sowie in sämtlichen Richtungen der Horizontalebene keine grössere Bedeutung hat.

Die erhaltenen Ergebnisse stützen die auf Seite 49 in Formeln ausgesprochene Auffassung über die Bedeutung der Zeitunterschiede bei der Seitenlokalisation des Schalles. Wenn wir auch infolge der Ungeübtheit der Vpn diesen Werten keine grössere Bedeutung beimessen können, so müssen wir doch konstatieren, dass die in der Mediane ( $0^\circ$  und  $180^\circ$ ) erhaltenen Schwellenwerte um etwa 25 % kleiner sind als diejenigen, die nach der Formel (4) auf S. 49 den bei anderen Winkeln erhaltenen Werten entsprechen würden. Dies kann darauf beruhen, dass die Vpn im gewöhnlichen Leben ihre genauesten Schallokalisationen ausführen, indem sie den Kopf so drehen, dass die Schallquelle in die Mediane zu liegen kommt, und dass infolge der Erfahrung die Richtungsempfindlichkeit an dieser Stelle gesteigert wird. Die Medianebene würde also eine »foveale« Zone des Hörraumes bilden.

Wir können auf jeden Fall feststellen, dass *die Schärfe des Richtungshörens im engeren Sinne, d.h. die Fähigkeit zu unterscheiden, welcher von zwei nacheinander dargebotenen Schällen der Mediane bzw. der Seitenrichtung näher liegt, einer einfachen Regel folgt (Formel 4, S. 49), nach welcher sie an der Mediane am genauesten ist, um nach der Seite hin abzunehmen*. Dass diese Regel nicht nur für die Horizontalebene und die Frontalebene, sondern auch für alle anderen Ebenen gilt, die senkrecht zur Medianebene liegen und einander in der Ohrenachse schneiden, ist nicht nur äusserst plausibel, sondern auch durch einige Blindversuche nachgeprüft worden.

Der grösste Teil der bisherigen Untersuchungen bezieht sich auf Richtungen, bei deren Lokalisation die Zeitunterschiede massgebend sein können. Wie schon früher hervorgehoben ist, kann durch den Zeitunterschied nur die evtl. Seitenlokalisierung des Schalles bewirkt werden; dagegen ist es nicht möglich, die Schallquelle auf dem zeitunterschied-äquivalenten Konusmantel genauer zu projizieren. Stehen uns andere Anhaltspunkte für diese letztere Lokalisation zur Verfügung oder ist unser Hörraum so beschaffen, dass wir zwar *eine* Projektion mit grosser Genauigkeit erhalten, bei der anderen Projektion aber im Stich gelassen werden?

Versuche zur Erklärung dieser Frage wurden mit 24 Vpn ausgeführt. Dabei wurde dasselbe Kugelgerippe wie oben benutzt. Die »Kastagnette« wurde, damit man sie bequem und von der Vp. unbemerkt an alle Stellen des Gerippes führen konnte, an dem einen Ende eines 80 cm langen leichten Holzstabes auf einer Gummiunterlage befestigt, und durch Ziehen an einer Schnur in Funktion gesetzt. In jeder Versuchsreihe wurden die Schallreize in zeitunterschied-äquivalenten Richtungen gegeben. Zuerst wurde die Medianebene untersucht, darauf die zeitunterschied-äquivalenten Richtungen  $30^\circ$  rechts,  $30^\circ$  links,  $60^\circ$  rechts und  $60^\circ$  links. Der Vp. wurde vor jeder Versuchsreihe mitgeteilt, in welchem Zirkel die Schallreize gegeben wurden, und ihre Aufgabe bestand darin, mit einem kleinen Stäbchen nach der Schallrichtung zu zeigen. Vor jeder Versuchsreihe wurde eine kleine Übung abgehalten. Diese Versuchsanordnung, die für die Seitenwinkelbestimmungen wegen ihrer Ungenauigkeit ungeeignet ist, ist hier berechtigt, da ihre Fehler im Vergleich zu der grossen Unschärfe der hier in Frage kommenden Lokalisation gering sind. An allen ausgewählten Stellen wurden schnell nacheinander 2—3 Knacksignale gegeben und die Richtung, nach der die Vp. zeigte, notiert. Mit jeder Vp. wurde nur ein Versuch in jeder Richtung angestellt.

Abb. 15 stellt die in den verschiedenen Richtungen der Medianebene erhaltenen Ergebnisse dar. Die Pfeile in jedem Teilbild zeigen die Richtung des Reizschalles und die Punkte an der Peripherie die Angaben der Vpn an. Die Anzahl der Punkte beläuft sich daher in jeder Figur wie diejenige der Vpn auf 24. Aus den Figuren ist ersichtlich, wie ungenau die Lokalisation des Schalles in der Medianebene ist. Auf einigen Bildern sieht man, dass sich die Punkte in der Nähe des Pfeiles mehr oder weniger sammendrängen, während in anderen nur spärliche oder gar keine richtigen Lokalisationen

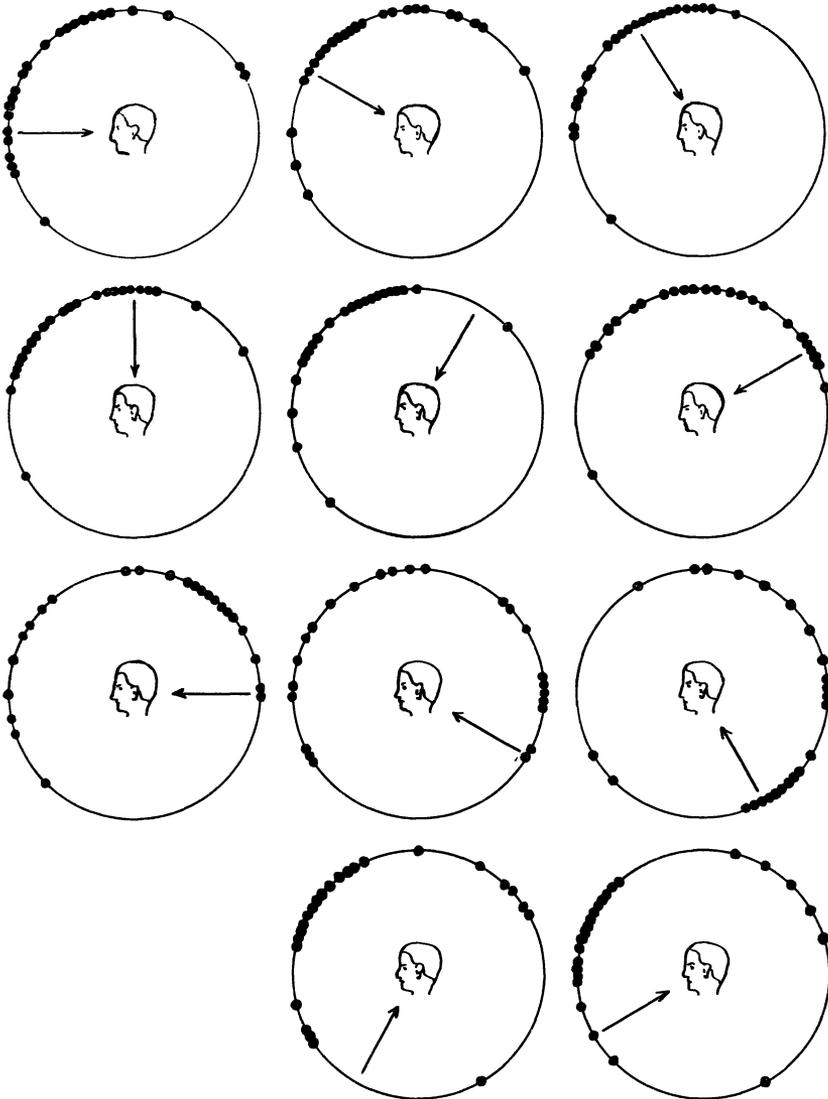


Abb. 15.

Die Lokalisation der in den verschiedenen Richtungen der Medianebene dargebotenen Schallreizen bei 24 Vpn.

zu finden sind. Ohne die Genauigkeit der Darstellung zu gefährden, habe ich hierbei zwei Punkte, die nach den Versuchsprotokollen zusammenfallen würden, nebeneinander gezeichnet.

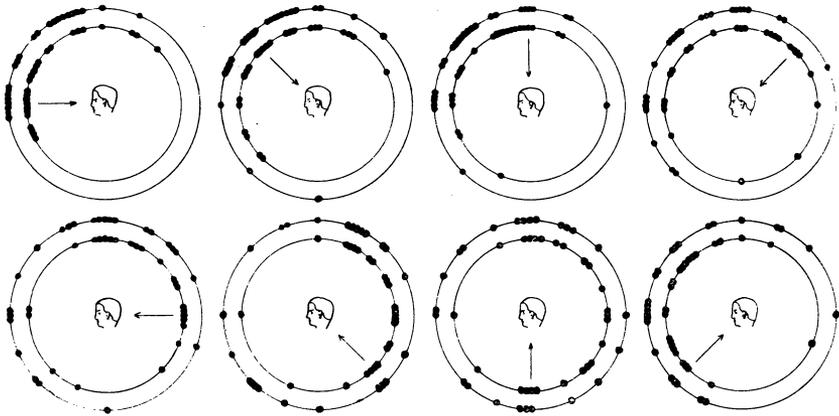


Abb. 16.

Die Lokalisation in den zeitunterschied-äquivalenten Richtungen von  $30^\circ$  rechts (der äussere Kreis) und links (der innere Kreis) bei 24 Vpn.

Abb. 16 stellt die Untersuchungen dar, die in den zeitunterschied-äquivalenten Richtungen  $30^\circ$  rechts (der äussere Kreis) und  $30^\circ$  links (der innere Kreis) von der Mediane vorgenommen wurden. Die gleiche Mangelhaftigkeit des Lokalisationsvermögens wie oben ist auch hier zu bemerken. Dasselbe gilt für die zeitunterschied-äquivalenten Richtungen  $60^\circ$  rechts und  $60^\circ$  links von der Medianebene; eine figürliche Darstellung dieser Ergebnisse halte ich für überflüssig.

Nach allen diesen Versuchen können wir sagen, dass unser Hörraum sehr eigenartig beschaffen ist. Jede gehörte Schallrichtung zeichnet sich hochgradig »astigmatisch« in unserem Bewusstsein ab; sie ist in einer Projektion scharf, in den übrigen mehrdeutig. Dieser Nachteil tritt aber nur beim *statischen Richtungshören*, also wenn der Kopf des Beobachters unbewegt bleibt, hervor. Durch Bewegen des Kopfes wird dem Beobachter die Lokalisation des Schalles bedeutend erleichtert. Im folgenden führe ich einige Beispiele aus dem Gebiet dieses, wie ich es nennen möchte, *kinetischen Richtungshörens* an.

Angenommen, eine Person lokalisiert ein fortdauerndes Geräusch oder dgl. auf Grund ihres statischen Richtungshörens, bei dem ihr die genauere Empfindung der Schallrichtung fehlt, in die Medianebene. Auf einmal bewegt sie den Kopf, beispielsweise um  $10^\circ$  nach rechts. Über die Weite dieser Kopfbewegung erhält sie eine Auffassung

durch labyrinthäre und propriozeptive Empfindungen. Über den relativen Bewegungswinkel der Schallquelle geben die evtl. Zeitunterschiede Auskunft. Empfindet die betr. Person die Schallquelle um  $10^\circ$  nach links verschoben, so weiss sie bestimmt, dass sich dieselbe in der Horizontalebene vorn befindet. Beträgt die scheinbare Verlagerung  $10^\circ$  nach rechts, so befindet sich die Schallquelle hinten in der Horizontalebene. Ist die subjektive Verlagerung der Schallquelle im Winkelmass kleiner als die Kopfdrehung, so wird der Schall um so mehr nach oben bzw. nach unten lokalisiert, je kleiner der Quotient der beiden Faktoren ist. Da die durch den Zeitunterschied bedingte Verlagerung der Schallquelle durch die Nn. cochleares und die Drehung des Kopfes wohl hauptsächlich durch die Nn. vestibulares empfunden wird, so können wir das Verhältnis zwischen dem sich aus dem ersteren und dem sich aus dem letzteren Anteil ergebenden Winkels den *cochleo-vestibulären Quotienten des kinetischen Richtungshörens* nennen. Die Bedeutung dieses Quotienten beschränkt sich natürlich nicht auf die Kopfdrehung in der Horizontalebene, sondern gilt auch für alle anderen Kopfbewegungen und zwar in folgender Weise: *Die Schallquelle wird um so näher an der Drehebene lokalisiert, je grösser der Quotient, und um so näher an der Drehachse, je kleiner der Quotient ist.* Dabei ist es gleichgültig, in welcher Seitenrichtung die Schallquelle sich befindet. Durch einige kleine »Peilungsbewegungen«, die oft ganz unbewusst ausgeführt werden, lässt sich die Schallrichtung immer eindeutig bestimmen. Beim Vernehmen eines fremden Lautes dreht der Mensch, sowie auch manche Tiere, den Kopf instinktiv nach der Seite des Schalles, in erster Linie natürlich, um die Ursache durch die Augen festzustellen, aber wohl auch um den Schall durch das kinetische Richtungshören genau zu lokalisieren, was hier um so leichter geschieht, wenn der Schall näher an die Medianebene, d.h. in das foveale Gebiet des Richtungshörens rückt. Wegen der Kleinheit der Schwellenwinkel im medianen Teil des Hörraumes ( $1^\circ$ — $1.5^\circ$ ) wird die kinetische Schallokalisation sehr genau, und dadurch erklärt sich der Umstand, dass wir im täglichen Leben kaum etwas von dem gewaltigen Astigmatismus verspüren, der unser statisches Richtungshören kennzeichnet.

## **Erwägungen über den Erregungsverlauf des Richtungshörreizes in den Gehörbahnen.**

Wenn auch bisher keine experimentellen Untersuchungen auf diesem Gebiet vorliegen, so halte ich es doch für motiviert, diese Umstände insoweit zu behandeln, als der heutige Stand der Forschung der Gehörphysiologie dies zulässt. Die Anatomie der Gehörleitungsbahnen ist von DAVIS (1934) in kurzer Form behandelt worden. Es ist interessant zu erfahren, dass die primären Neurone des Gehörnerven teils im ventralen, teils im dorsalen Nucleus nervi cochlearis enden. Aus diesen entspringen die Neurone zweiten Grades, die entweder direkt oder durch Vermittlung von Zwischenneuronen längs des gekreuzten Lemniscus lateralis zum Corpus geniculatum mediale verlaufen. Wenn auch der grösste Teil dieser Neurone die Mittellinie überkreuzt, so existieren doch auch homolaterale Verbindungen zwischen Nucleus cochlearis und Corpus geniculatum mediale. Das letztere ist mit der Hirnrinde durch die aus den Neuronen höheren Grades bestehende Hörstrahlung verbunden, die fächerartig zur vorderen Kante der oberen Schläfenwindung verläuft, wo sie tief in die Sylviische Furche hineinragt. Diese Region soll eine Kernzone für die ganze Hörrinde sein, und erst nach dem Durchlaufen dieser Zone können die Impulse in die umgebende Rinde weitergeleitet werden.

Seitdem WEVER und BRAY (1930) mit ihren klassischen Arbeiten über die Natur der Aktionsströme des Gehörnerven den Weg zu weiteren Untersuchungen gewiesen hatten, hat das Studium dieser Phänomene festen Fuss gefasst. — Die cochlearen Aktionspotentiale, die viel stärker als diejenigen des Gehörnerven sind, haben wahrscheinlich keinen direkten Zusammenhang mit dem Richtungshören. Dagegen kann man in den Aktionspotentialen längs der Gehörleitung Erscheinungen beobachten, die man gern in Verbindung mit der Lokalisation des Schalles setzen möchte.

Nach den Untersuchungen von DAVIS (1934) kann man aus dem Gehörnerven synchrone Impulse bis zu einer Frequenz von 3 000 Hz

des Reiztones erhalten; doch sind dieselben zwischen 2000 und 3000 Hz sehr viel schwächer als bei Tönen niedrigerer Frequenz. Beträgt die Tonfrequenz mehr als 1000 Hz, so kann man neben den synchronen Impulsen auch asynchrone beobachten, und zwar um so mehr, je höher der Ton ist; bei Frequenzen oberhalb 3000 Hz sind alle Impulse asynchron. Aus den vorläufigen Mitteilungen von DAVIS geht hervor, dass das Gesagte auch für die sekundären Neurone im Lemniscus lateralis gilt. Im Colliculus inferior, durch welchen ein Teil der Verbindungen zwischen Nucleus cochlearis und Corpus geniculatum mediale verläuft, hört die Synchronisierung meistens schon unterhalb 1000 Hz auf. Im Corpus geniculatum mediale soll man mit Ausnahme des beim Einsetzen des Tones entstehenden Impulsausbruches keine synchronen Impulse mehr gefunden haben. Je mehr Synapse die Impulse durchlaufen, desto geringer werden die synchronen Impulse und desto hervorragender wird der Ein-Effekt. Nach dem Autor beruht dieser Effekt unzweifelhaft auf der guten Synchronisierung des ersten Impulsausbruches und auf der anschliessenden asynchronen Aktion. Was die elektrische Aktivität der Hirnrinde betrifft, so kann man bei den Knacksignalen oder beim Einsetzen eines Tones nach einer Latenzzeit von etwa 8  $\sigma$  eine elektropositive Zacke beobachten, die ihr Maximum binnen 3  $\sigma$  erreicht und noch langsamer abfällt. Die Frequenz des Reiztones wird hier nicht mehr wiedergegeben, und man kann auch hinsichtlich der Tonhöhe keine Lokalisierung in der Hirnrinde finden.

An zwei Stellen seiner Abhandlung erwähnt DAVIS das Richtungshören. Im Zusammenhang mit den Aktionsströmen von Colliculus inferior äussert er: — »which is probably a relay station for reflex responses of orientation to sounds» — und in den theoretischen Betrachtungen am Schluss der Abhandlung: »Another implication is that the reproduction in the pattern of the nerve impulses of the frequencies of incident sound waves is to be regarded as incidental to the mechanism of excitation of the auditory nerve fibres, and of little or no significance in determining the attributes of sensation. It is probably of considerable importance, however, in the binaural localization of the source of sound on the basis of phase or time differences».

Was diese Bemerkungen, besonders die erstere, betrifft, so gibt der Autor nicht an, worauf er sie begründet. Jedenfalls sind die von ihm ermittelten experimentellen Tatsachen hier von grösstem Interesse. Haben wir doch gefunden, dass Knackgeräusche und schnell

ein- und ausschwingende Töne leicht zu lokalisieren sind. Andererseits sind dies die einzigen Schälle, deren Wirkung sich nicht nur bis in das Corpus geniculatum mediale, sondern bis in die Hirnrinde erstreckt (über die Impulse beim Ausschwingen eines Tones wird vom Autor allerdings nur im Zusammenhang mit den Aktionspotentialen der Cochlea gesprochen). Wir können uns vorstellen, dass es irgendwo im Gehirn »Stellen« gibt, die Impulse von Seiten beider Gehörbahnen empfangen können. Dann werden die eher eintreffenden Impulse eine Anzahl dieser »Stellen« besetzen, so dass die von dem abgewandten Ohr herstammenden, später eintreffenden Impulse nicht wie die ersteren zu ihrem Rechte kommen können, und die »Wage des Richtungsurteils« sich zu den ersteren neigt. Erreichen die beiderseitigen Impulse diese Stellen gleichzeitig, so wird das Gleichgewicht nicht gestört, und wir erhalten eine Mittenlokalisation des Schalles. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung in verschiedenen Nervenfasern verschieden ist, so werden bei einem sehr kleinen Zeitunterschied die von der abgewandten Seite ausgehenden Impulse schon eintreffen, nachdem erst wenige »Stellen« durch die zuerst anlangenden Impulse besetzt sind, und werden wir eine kleinere Seitenlokalisation erhalten, als wenn der Zeitunterschied gross ist und der grösste Teil oder alle Impulse der einen Seite ihr Ziel erreicht haben. Besteht bei einem kleinen Zeitunterschied ein grosser entgegengesetzter Intensitätsunterschied, so ist auch die Anzahl der tätigen Elemente auf dieser Seite grösser als auf der ersteren, und an der Spitze des »Wettlaufs« stehen hier die an Zahl überlegenen Impulse, welche die von der anderen Seite herkommenden, in der Minderzahl befindlichen Impulse besiegen können. Hieraus würde sich der von mehreren Autoren beobachtete Umstand erklären lassen, dass kleine Zeitunterschiede durch entgegengesetzte Intensitätsunterschiede kompensiert werden können. Ist der durch künstliche Massnahmen erzeugte Zeitunterschied wiederum grösser als der in der Natur vorkommende, so ist der dabei entstehende Doppelschall dadurch zu erklären, dass die Refraktärzeit nach den zuerst angekommenen Impulsen schon vergangen ist, so dass die Endstellen die von der anderen Seite später als unter natürlichen Verhältnissen ankommenden Impulse wieder empfangen können, die naturgemäss eine Schallokalisation auf ihrer Seite ergeben.

Auch diese Umstände sprechen dafür, dass der Zeitunterschied den massgebenden Faktor beim Richtungshören darstellt. Der Um-

stand, dass einige Tiere trotz ihres kürzeren Ohrenabstandes genauer lokalisieren können als der Mensch (s. S. 14), könnte darauf beruhen, dass bei diesen Tieren auch die Gehörleitungsbahnen kürzer sind. Infolgedessen wird die Verteilung der Impulse auf Grund der verschiedenen Leitungsgeschwindigkeiten in den Gehörnervenfasern eine engere sein, wobei die Front der zuerst ankommenden Impulse entsprechend dichter würde.

## Schlussbemerkungen.

Mit unserem normalen, binauralen Hören ist stets ein Richtungsinhalt verbunden, der bei Knällen und Geräuschen deutlicher, bei Klängen verschwommener wahrgenommen wird. Ebenso wie wir unsere Gesichts-, Berührungs-, Wärme-, Kälte-, Schmerz- und Propriozeptivempfindungen lokalisieren, tun wir dies auch mit unseren Gehörsempfindungen. Wird der binaurale Effekt künstlich ausgeschaltet, wie beim gewöhnlichen Rundfunkhören, so erhält man einen unnatürlichen Eindruck, der teils auf dem Fehlen der Schalllokalisation, teils auf dem Fehlen der Klangfülle, der Plastizität des Schalles, beruht. Diese Verschiedenheit in der Schallqualität beim monauralen und binauralen Hören ist bisher nicht erklärt worden.

Die massgebende Bedeutung der Zeitunterschiede beim Richtungshören kann als sicher gelten. Schon die Kleinheit der Richtungsschwellenwinkel (bestenfalls  $< 1^\circ$ ) macht es schwer, einen anderen Umstand an die Stelle des Zeitunterschieds zu setzen. Bei so kleinen Winkeln ist aber auch der Zeitunterschied erstaunlich gering, kaum ein Hunderttausendstel Sekunde. Kleine Distanzen können wir ohne scharfe Striche im Messgerät nicht wahrnehmbar machen; ebenso verschwinden geringe Zeitunterschiede, wenn der Schall keine scharfen Zeitmarken enthält. Wie wir uns erinnern, kommen solche Zeitmarken nur bei unperiodischen Schallphänomenen (Knällen, Geräuschen) vor. Da auch diese in Frequenzkomponenten zerlegt werden können, so ist es offenbar, dass gerade die hohen Komponenten für diese kleinsten Zeitunterschiede bedeutungsvoll sind. Beträgt die Frequenz einer Komponente 1 000 Hz, so macht der kleinste wahrnehmbare wirksame Weglängenunterschied nur 1 % von der Wellenlänge und der daraus berechnete, bei jeder Phase wirksame Schalldruckunterschied höchstens 3 % der Grenzwerte aus. Die Ausnützung einer solchen Frequenzkomponente eines Schalles ist deshalb viel kleiner als diejenige einer Komponente von 10 000 Hz, wo der kleinste wirksame Weglängenunterschied

10 % der Wellenlänge und der Schalldruckunterschied zwischen den Ohren 62 % von der ganzen Schalldruckamplitude beträgt. Hier sehen wir, dass Schallbestandteile, die noch weit unterhalb der oberen Hörgrenze liegen, ihre Aufgabe als Zeitmarken des Richtungshörens wohl erfüllen können. Kommen wir doch hier letzten Endes zu den Phasenunterschieden als wirksame Faktoren, aber in einem anderen Sinne als diejenigen Autoren, welche die Phasenunterschiede langdauernder Töne als bedeutsam für das Richtungshören ansprechen. Hier handelt es sich nur um eine zufällig und vereinzelt kommende und gehende Schallkomponente, die so hoch ist, dass es fraglich erscheint, ob sie bei periodischer Wiederholung irgendeine synchrone Reizung des Gehörnerven verursachen könnte, und die auch subjektiv als ein ultramusikalischer zischender Ton empfunden wird. Beim Einsetzen einer solchen Komponente emittieren die Hörzellen in der Schnecke einen Schwarm von Impulsen, von denen die aus dem näher an der Schallquelle befindlichen Ohr stammenden eher zum Ziel gelangen als die aus dem abgewandten Ohr stammenden, wodurch die Seitenlokalisation des Schalles empfunden würde. Werden diese Komponenten periodisch wiederholt, so dürften die folgenden Schallwellen keinen ähnlichen Impulsausbruch hervorrufen können, da sich die Hörzellen noch im Refraktärstadium befinden. In dem Masse, wie dies Stadium abklingt, könnten die Hörzellen wieder auf neue Schallwellen reagieren; dies müsste aber unregelmässig geschehen, geschweige denn, dass es in beiden Ohren gleichzeitig erfolgen würde. Dieser Umstand, auf dem es u.a. beruht, dass beim Oszillographieren der Aktionsströme des Gehörnerven bei hohen Tönen nur der erste Ausbruch und eine darauffolgende schwächere aperiodische Impulsentladung erhalten wird, erklärt meines Erachtens die kleinen Richtungsschwellen bei aperiodischen und die grossen bei periodischen Schällen. Bei niedrigen Tönen (unterhalb 500 Hz), die bei jeder Periode einen gleichen Schwarm von Impulsen emittieren könnten, da die Refraktärzeit in diesem Falle kürzer ist als die Periodendauer, könnte also die Lokalisation auf Grund der Phasenunterschiede möglich sein. Doch gehen die Schalldruckschwankungen bei diesen Tönen so langsam vor sich, dass die wichtige Front der Impulse verschwommen wird. Aus drei weiteren Gründen kann ich den Phasenunterschieden keine grössere Bedeutung für die Schallrichtungswahrnehmung zubilligen: 1) weil die Untersuchungen derjenigen Autoren, die ihre Versuche mit elektrischen Stimmgabeln ausgeführt haben, nicht ganz ein-

wandfrei sind, 2) weil der Anteil jener relativ niedrigen Töne, bei denen die Phasenunterschiede zur Geltung kommen könnten, an allen von uns gehörten Schällen klein ist, zumal da sie in der Natur niemals in reiner Form vorkommen. 3) weil meine eigenen Untersuchungen keine genügende Begründung für die Phasentheorie geliefert haben.

Die Benennung »Intensitätsunterschied« wird zweckmässig durch »Schallfarbenunterschied« ersetzt, da die Intensität der Geräusche sowie auch der Klänge nicht eindeutig zu definieren ist. Die theoretische Möglichkeit, dass bei Änderung der Ohrenlage die Verhältnisse der Schallkomponenten unverändert blieben, trotzdem die Gesamtintensität sich veränderte, dürfte in der Natur niemals vorkommen. Nur bei Anwendung eines ohmschen Potentiometers und der Kopfhörer ist ein solcher Intensitätsunterschied zustandezubringen. Die in dieser Weise ausgeführten Versuche lieferten indessen ein Ergebnis, nach welchem solche Intensitätsunterschiede keinen bedeutenden lokalisatorischen Einfluss haben. Die in der Natur vorkommenden Schallfarbenunterschiede können durch das Phantom nachgeahmt werden; es ist aber unmöglich, die dabei entstehenden Zeitunterschiede auszuschalten. Da diese beiden Unterschiede auch in der Natur immer zusammen auftreten, so könnte es fraglich erscheinen, welchem von beiden man den Vorzug geben sollte, dem Zeitunterschied oder dem Schallfarbenunterschied. Aus meinen Versuchen mit binauraler Schallübertragung (s. S. 63 u. 65) geht aber hervor, dass durch Zeitunterschiede allein (mit blossen Mikrofonen) ebenso kleine Schwellenwerte zu erreichen sind, als wenn man die Schallfarbenunterschiede (durch Phantom) mit berücksichtigt. Trotzdem dürfte den Schallfarbenunterschieden eine Bedeutung beim binauralen Hören zukommen. Sie können gewissermassen die Entscheidung zwischen den verschiedenen zeitunterschied-äquivalenten Richtungen erleichtern, vorausgesetzt, dass die Schallfarbe uns von früher her bekannt ist. Die Schallfarbe eines hinter unserem Kopf befindlichen Schallquelle ist dunkler, als wenn die Schallquelle nach vorn gebracht wird. Bringen wir die eine von zwei Schallquellen gleicher Schallfarbe vor und die andere hinter die Vp. (diese Versuche sind an vielen Vpn vorgenommen), so werden sie meist leicht voneinander unterschieden. Wird die Schallfarbe der erstgenannten Schallquelle »verdunkelt« und die der letztgenannten »aufgehellt«, so verwechselt die Vp. fast ausnahmslos die beiden Schallquellen miteinander, da sie die Vorn- und Hinten-

lokalisation nach der Schallfarbe beurteilt. Eine solche Täuschung in der statischen Schallokalisation wird sogleich entdeckt, wenn die Vp. kleine Kopfbewegungen ausführt, d.h. kinetisch lokalisiert.

Wir haben früher über die zeitunterschied-äquivalenten Kegel gesprochen. Bei genauer mathematischer Betrachtung erweisen sie sich nicht als Kegel, sondern als zweimantelige Hyperboloide. Die Abweichung von dem Kegel wird aber erst dann bedeutend, wenn die Schallquelle sich in unmittelbarer Nähe des Kopfes der Vp. befindet. Bei Entfernungen, die grösser als 50 cm sind, spielt die Wölbung keine praktische Rolle mehr, und wir können uns die Sache dahin vereinfachen, dass wir statt der Hyperboloide ihre Asymptotenkegel als zeitunterschied-äquivalent betrachten. Wenn wir statt des ganzen Hörraumes nur z.B. die Horizontalebene betrachten, so können sich unsere Berechnungen der Hyperbel und ihrer Asymptoten auf diejenigen von v. HORNBOSTEL (1922) stützen.

Der »Astigmatismus« des Richtungshörens ist kein Fehler im gleichen Sinne wie derjenige der Augen. Er ist die unvermeidliche Folge der Richtungswahrnehmung durch nur zwei akustische Punkte. Verfügten wir über drei solche Punkte, so würden die zeitunterschied-äquivalenten Kegel verschwinden, und jede Schallrichtung wäre zeitunterschied-äquivalent mit ihrem Spiegelbild auf der anderen Seite der durch diese drei Punkte bestimmten Ebene. Erst durch vier Ohren, die nicht in derselben Ebene lägen, könnten wir die Schallrichtung durch Zeitunterschiede ganz eindeutig empfinden. Die kinetische Schallokalisation ersetzt aber diese Mangelhaftigkeit unseres Raumhörens, und deshalb dürfte die Funktion des Labyrinthes eine grosse Bedeutung bei der Schallokalisation, wie überhaupt bei unserer Orientierung in dem uns umgebenden Raum haben.

## Zusammenfassung.

Wie aus dem geschichtlichen Überblick ersichtlich ist, herrscht bisher noch keine Einigkeit über die spezifischen Reizfaktoren des Richtungshörens, sondern werden Intensitäts-, Phasen- und Zeitunterschiede als solche angesprochen. Die neueren Untersuchungen, insbesondere diejenigen von v. HORNBOSTEL liefern eine Stütze für den Standpunkt, dass den Zeitunterschieden die grösste Bedeutung beim Richtungshören zukommt.

Meine eigenen Untersuchungen beziehen sich 1) auf die beim Richtungshören wirksamen äusseren Faktoren (Intensitäts-, Phasen- und Zeitunterschiede) und 2) auf die Richtungshörschärfe selbst.

Die Intensitätsunterschiede an den beiden Ohren wurden durch Bestimmung der Hörschwellen bei verschiedenen Einfallswinkeln des Reiztones untersucht. Bei niedrigen Tönen sind die Intensitätsunterschiede gering; bei höheren sind sie um so grösser, je höher die Frequenz ist. Die Schallintensitäten in verschiedenen Richtungen derselben Ebene folgen nicht bei allen Frequenzen demselben Gesetz, sondern weisen auch bei einer und derselben Vp. Unregelmässigkeiten auf, die wohl auf Reflexions-, Beugungs- und Resonanzerscheinungen infolge anatomischer Verhältnisse beruhen. Aus diesem Grunde sind die Frequenzspektra (= Schallfarben) zusammengesetzter Schallphänomene (Klänge, Geräusche) in verschiedenen Richtungen ungleich. (Demnach wäre die Benennung »Schallfarbentheorie« passender als »Intensitätstheorie«). Die gleichen Umstände wurden auch bei den Versuchen gefunden, die mittels des Kopfphantoms, das durch seine Ohrmikrophone eine oszillographische Analyse der Schalleinwirkungen ermöglichte, ausgeführt wurden. Mit dem Phantom wurden auch die Phasen (= Zeit)unterschiede bei verschiedenen Frequenzen untersucht. Die Ergebnisse bestätigten die Haltbarkeit der v. HORNBOSTEL-WERTHEIMERSCHEN Theorie, wonach die Konstante  $k = 21$  cm den wirksamen Weglängenunterschied zwischen den Ohren bei Seitenrichtung des Schalles darstellt.

Die Bestimmungen der *Richtungshörschärfe* wurden in analoger Weise wie die Sehschärfenbestimmungen ausgeführt, d.h. durch Feststellung des kleinsten Winkels, unter welchem man zwei akustische sukzessiv dargebotene Punkte getrennt unterscheiden kann. Es wäre unzweckmässig, als Anhaltspunkt für die Richtungsschwellenbestimmung die Abweichung von der Mediane anzuwenden, da die subjektive Mediane, wie auch aus den Versuchen hervorgeht, schwankend ist.

Die mit Knackgeräuschen ausgeführten Versuche erweisen, dass zwei akustische Punkte voneinander unterscheidbar sind, wenn die Differenzen ihrer wirksamen Zeitunterschiede einen gewissen minimalen Wert überschreiten, der bei allen Seitenrichtungen der Schallquellen konstant ist. Infolgedessen vergrössert sich der Richtungshörschwellenwinkel  $\beta$  (in der Mediane =  $\alpha_0$ ) bei Vergrösserung des Grundseitenwinkels  $\alpha$  gemäss der Formel  $\beta = \alpha_0 \sec \alpha$ . Dies gilt nicht nur in der Horizontal- und Frontalebene, sondern auch in allen anderen Ebenen, die senkrecht zur Medianebene stehen. Bei einseitigem Ohrverschluss sind die Schwellenwinkel grösser, als wenn die beiden Ohren offen sind. Ebenso vergrössern sich die Schwellen, wenn die Schallfarbe der Knacksignale verdunkelt wird. Bei Tönen sind die Schwellenwinkel desto kleiner, je kürzer die Ein- und Ausschwingzeiten sind. Bei Tongemischen und bei Dauergeräuschen sind die Schwellenwinkel klein, da diese Schälle nur scheinbar kontinuierlich sind. Bei Dauertönen, die keine »Zeitmarken« für die Richtungsbestimmung enthalten, sind die Schwellenwinkel gross. Diese Beobachtung spricht gegen die Bedeutung der Phasen- und der Intensitätsunterschiede beim Richtungshören. Durch stetig veränderliche Phasenunterschiede konnten keine deutlichen Drehtöne hervorgebracht werden.

Die *binaural-elektrische Schallübertragung* ergab ausser der Lokalisation auch eine Klangfülle, die der gewöhnlichen (Rundfunk, Tonfilm usw.) fehlt. Hier wurde bei einem Mikrophonabstand von 22 cm ( $k = 21$  cm!) die Schallquelle nach der Seitenrichtung lokalisiert. Wurde der Mikrophonabstand bis über  $2k$  vergrössert, so erschien ein Doppelschall. Die Intensitätsunterschiede ergaben keine Projektion des Schalles nach aussen. Wird der Intensitätsunterschied aber ein 5 bis 10 facher, so verdoppelt sich der Schall in der Weise, dass der eine Anteil in der dem Zeitunterschied entsprechenden Richtung und der andere in dem stärker erregten Ohr selbst empfunden wird.

Die Schallokalisation findet in irgendeiner der zeitunterschied-äquivalenten Richtungen statt, die zusammen einen Kegelmantel (eigentlich ein Hyperboloid) bilden. Zwischen diesen Richtungen kommt ein spontaner Richtungswechsel infolge von »psychologischen« Faktoren vor. Die Untersuchungen, die mit dem Kopf im freien Schallfeld ausgeführt wurden, ergaben, dass unser Richtungshören insofern »astigmatisch« ist, als es uns öfters nicht gelingt, zeitunterschied-äquivalente Richtungen voneinander zu unterscheiden. Dies betrifft nur das »statische« Richtungshören, d.h. das Richtungshören in dem Fall, wo der Kopf des Beobachters unbewegt bleibt. Beim »kinetischen« Richtungshören, also in dem Fall, wo der Beobachter den Kopf bewegt, erhält er auf dem cochlearen Wege Empfindungen über Veränderungen der Zeitunterschiede und auf dem labyrinthären Wege Empfindungen über Veränderungen der Kopf Lage, wobei der *cochleo-vestibuläre Quotient* die subjektive Lokalisation des Schalles ergibt.

Schliesslich werden neueste Untersuchungen über die Erregungsvorgänge in den Gehörbahnen behandelt und der Zeitunterschied als spezifischer Richtungshörreiz im Lichte derselben erklärt.

## Literaturverzeichnis.

- AGGAZZOTTI, A., Arch. di fisiol. 1921. 19. 33. Ref. Ber. ü. d. ges. Physiol. 9. 280.  
—»— Boll. Soc. ital. Biol. sper. 1929. 4. 564. Ref. Ber. 52. 309.
- ALLERS, R. u. BÉNESI, O., Z. ges. Neurol. u. Psychiatr. 1922. 76. 18.  
ALLERS, R., Psyche 1922. 3. 161. Ref. Ber. 19. 537.  
—»— Monatsschr. Ohrenheilk. u. Lar.-hinol. 1924. 58. 422.  
—»— u. SCHMIEDEK, O., Psychol. Forsch. 1924. 6. 92.
- BANISTER, H., Brit. Journ. psychol. a. gen. sect. 1924. 15. 80. Ref. Ber. 28. 294.  
—»— Brit. Journ. psychol. 1925. 15. 280. Ref. Ber. 31. 113.  
—»— Brit. Journ. psychol. 1926. 16. 265. Ref. Ber. 37. 178.
- BARD, L., Journ. de physiol. et de pathol. gén. 1921. 19. 216.
- BÉKÉSY, G. v., Physik. Z. 1930. 31. 824 u. 857.
- BONACINI, C., Arch. di fisiol. 1933. 32. 490. Ref. Ber. 77. 154.
- BOWLKER, T. J., Philos. Magazine. 15. 318. Ref. Jahresb. Physiol. 1908.
- BRUNZLOW, Z. Sinnesphysiol. 1925. 56. 326.
- DAVIS, H., A Handbook of General Experimental Psychology. Worcester, Mass. 1934. 962.  
—»— ; DERBYSHIRE, A. J.; LURIE, M. H. u. SAUL, L. J., Amer. Journ. Physiol. 1934. 107. 311.
- DOEVENSPECK, H., Z. Sinnesphysiol. 1927. 58. 308.
- ENGELMANN, W., Z. Psychol. 1928. 105. 317.
- ESSEN, Ja. van, Nederl. Tijdschr. Psychol. 1934. 2. 386. Ref. Ber. 87. 397.
- FRY, Thornton C., Physik. Ztschr. 1922. 14. 273.
- GATSCHER, S., Wien. klin. Wschr. 1924. 37. 731.
- GILSE, v. u. ROELOFS, O., Acta oto-laryng. 1930. 14. 1 u. 79.
- GOLDSTEIN, K. u. ROSENTHAL-VEIT, O., Psychol. Forsch. 1926. 8. 318.
- GRÜTZMACHER, M. u. MEYER, E., Elektr. Nachr.-Technik 1927. 4. 203. Zit. Trendelenburg 1930. 827.
- GUNS, P. u. ROUSSE, C., Ann. Mal. Oreille 1929. 48. 813. Ref. Ber. 53. 258.
- HALVERSON, H. M., Psychol. Monogr. 1922. 31. 7. Ref. Ber. 15. 117.  
—»— Am. Journ. Psychol. 1922. 33. 178.  
—»— Am. Journ. Psychol. 1927. 38. 97.
- HARTLEY, R. V. L. u. FRY, Thornton G., Phys. Rev. 1921. 4. 532. Ref. Ber. 9. 280.
- HARTRIDGE, H., Journ. of physiol. 1934. 87. 17 P.
- HECHT, H., Naturwissenschaften 1922. 10. 107.
- HELMHOLTZ, Die Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig 1913.
- HOLT-HANSCH, Z. Psychol. 1931. 120. 209.
- HORNPOSTEL, E. M. v. u. WERTHEIMER, M., Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss. Berlin. 1920. 388. Ref. Ber. 2. 332.

- HORNPOSTEL, E. M. v., *Jahresb. ü. d. ges. Physiol.* 1922. 1. Hälfte. 389.  
 —»— *Psychol. Forsch.* 1923. 4. 64.  
 —»— *Handb. d. norm. u. path. Physiol.* 1926. XI. 602.
- HUMBY, S. R., *Nature (London)* 1930. II. 682.
- JEWETT, F. B., *Science (N. Y.)*. 1933. I. 435. *Ref. Ber.* 74. 331.
- KIEFER, MARIA, *Arch. f. d. ges. Psychol.* 1922. 42. 185.
- KLEMM, O., *Arch. f. d. ges. Psychol.* 1920. 40. 117.
- KREIDL, A. u. GATSCHER, S., *Zbl. Physiol.* 1920. 34. 490.  
 —»— *Pflüg. Arch.* 1923. 200. 366.  
 —»— *Pflüg. Arch.* 1925. 207. 85.
- LACHMUND, H., *Z. Psychol.* 1921. 88. 1 u. 53.
- LO SURDO, A., *Atti d. R. accad. naz. dei Lincei. Rendiconti.* 1921. 30. 125.  
*Ref. Ber.* 9. 280.
- LÜBCKE, E., *Z. techn. Physik* 1934. 15. 652. *Zit. Trendelenburg* 1935. 145.
- MARX, W. u. MARX, H., *Beitr. z. Anat. Physiol. Pathol. u. Therap. d. Ohr. d. Nase u. d. Hals.* 1921. 16. 32. *Ref. Ber.* 7. 83.
- MEYER, E. u. BUCHMANN, G., *Biol. Ber. Physik.-math. Kl.* 1931. 32. 735. *Zit. Trendelenburg* 1935. 115.
- MONJÉ, M., *Z. Sinnesphysiol.* 1935. 66. 7.
- MORE, L. T. u. FRY, H. S., *Philos. Magazine* 13. 452. *Ref. Jahresb. f. Physiol.* 1907.
- PEREKALIN, W. E., *Z. Hals- usw. Heilk.* 1930. 25. 442.
- RAUCH, M., *M Schr. f. Ohrenh. u. Lar.-Rhinol.* 1922. 56. 176 u. 183.
- Lord RAYLEIGH, *Philos. Magaz.* 13. 214 u. 316. *Ref. Jahresb. Physiol.* 1907.
- REGEN, J., *Sitzungsber. d. Akad. Wien, Math.-naturw.* 1924. 132. 81.
- REJTÓ, A., *M Schr. Ohrenheilk.* 1931. 65. 959. *Ref. Ber.* 63. 790.
- RENQVIST-REENPÄÄ, Y., *Allgemeine Sinnesphysiologie.* Wien, 1936.
- SCHEMINZKY, F., *Die Welt des Schalles.* Graz, Wien, Leipzig u. Berlin 1935.
- SEASHORE, C. E., *Psychol. Monogr.* 1922. 37. 1. *Ref. Ber.* 15. 116.
- SHAXBY, J. H. u. GAGE, F. H., *Med. res. council* 1936, spec. rep. 166. 1.
- STEVENS, S. S. u. NEWMAN, E. B., *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 1934. 20. 593.
- STEWART, G. W., *Physic. Review* 1920. 15. 432. (I)  
 —»— *Proc. Nat. Acad.* 1920. 6. 166. (II)  
 —»— *Psychol. Monogr.* 1922. 37. 30. *Ref. Ber.* 15. 117.
- TRENDELENBURG, F., *Abderhald. Handb.* V. 7. 1930. 787.  
 —»— *Klänge und Geräusche.* Berlin 1935.
- TRIMBLE, O. C., *Am. J. Psychol.* 1929. 41. 564.
- TRÖGER, J., *Physik. Z.* 1930. 31. 26.
- TULLIO, P., *Arch. ital. de biol.* 1926. 77. 58. *Ref. Ber.* 47. 798.
- VALENTINE, W. L., *Journ. of comp. psychol.* 1927. 7. 357.
- WIEN, M. v., *Pflüg. Archiv.* 1903. 97. 1.
- WILSKA, A., *Skand. Arch. f. Physiol.* 1935. 72. 161.
- YOUNG, P. TH., *J. of exper. Psychol.* 1928. 17. 399. *Ref. Ber.* 49. 675.