

Richtungshörversuche über einen nachgebildeten Kopf

P. Damaske und B. Wagener

Zusammenfassung In die Ohren des Kopfes einer Schaufensterpuppe wurden zwei Sondenmikrofone eingebaut. Das Richtungshörvermögen für Schalleinfall aus der Scheitelebene und der dazu senkrechten »Horizontalebene« dieses Kunstkopfes wurde über Kopfhörer gemessen. Es gelingt mit dieser Anordnung, die Schalleinfallrichtungen festzustellen. Die Richtungsangaben für Schalleinfall aus der Scheitelebene weisen die größte Streuung auf. Für die Scheitelebene wurde das Richtungshörvermögen des natürlichen Kopfes zum Vergleich gemessen.

1. Einleitung

Beim Richtungshören des Menschen werden vom Gehör hauptsächlich Intensitäts- und Laufzeitunterschiede zwischen den an beiden Ohren empfangenen Signalen ausgewertet und daraus eine Hörrichtung bestimmt. Daß diese Größen tatsächlich richtungsbestimmend sind, wird zum Beispiel durch die üblichen Stereophonie-Verfahren bewiesen [1], [2]. Mit solchen Unterschieden kann dagegen nicht die tatsächlich (auch im freien Schallfeld) teilweise mögliche Unterscheidung der Schalleinfallrichtungen »vorn« und »hinten« erklärt werden. Für Schalleinfall aus Richtungen der »Scheitelebene« können bei symmetrischem Kopf keine interauralen Unterschiede auftreten. Es liegt in diesem Fall nahe, richtungsunabhängige Klangänderungen als eine Erklärungsmöglichkeit in Betracht zu ziehen [13]. Den aus der Scheitelebene, meistens »von vorn« oder »von hinten« einfallenden Schallsignalen unserer täglichen Umwelt (zum Beispiel Sprache) wären danach charakteristische Klangunterschiede aufgeprägt, an denen die Richtung erkannt werden könnte.

Je nach der Schalleinfallrichtung sind die Signale tatsächlich im Klang verfärbt. Sie durchlaufen richtungsabhängige Filter, bevor sie analysiert werden. Die Filterwirkung wird durch frequenzabhängige Beugung oder Abschattung des Schalles durch das Hindernis »Kopf« verursacht. Die Frequenzkurven gleicher Lautstärke für Sinustöne werden aus diesem Grunde meist im freien Schallfeld »bei Schalleinfall von vorn« gemessen.

Sollen diese richtungsabhängigen Filter für einen Hörversuch benutzt und nachgebildet werden, so wird am besten gleich von einem modellierten menschlichen Kopf mit eingebauten Mikrofonen als Ohren ausgegangen [3], [4], [5]. Messungen der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs für unterschiedliche Schalleinfallrichtungen sind von verschiedenen Autoren durchgeführt worden [4], [6], [7], [11]. Ein »Kunstkopf« kann diesen Meßergebnissen angepaßt werden.

Für Richtungshörversuche, die in den Abschnitten 3.2. und 3.3. beschrieben werden, wurde ein menschlicher

1. Introduction

In human directional hearing, intensity and travel-time differences between the signals received at both ears are evaluated and thereby determine a hearing direction. That these values are in fact determining the direction is proved for example by the normal stereophonic methods [1], [2]. On the other hand, such differences cannot explain the partly possible differentiation (even in the free sound field) between a "front" and "rear" sound-incidence. For sound incidence from directions in the parietal plane, no interaural differences can occur with a symmetrical head. In this case it would appear obvious to attempt to explain this phenomenon with direction-dependent changes of timbre [13]. This would imply that sound signals which come from the parietal plane, mostly "from the front" or "from the rear" and with which we are daily confronted (for example speech), exhibit characteristic tonal differences enabling us to identify the direction.

Depending on the sound-incidence direction, the signals do in fact differ in their tonal quality. They pass through direction-dependent filters before they are analysed. The filtering action is brought about by the frequency-dependent diffraction or shielding of the sound by the obstructive "head". The frequency curves of the same loudness level for sine-wave tones are for this reason mostly measured in the free sound field "with sound incidence from the front".

If these direction-dependent filters are to be copied and used for a hearing test, the best approach proves to be the use of an anatomically shaped head phantom with built-in microphones in place of the ears [3], [4], [5]. Measurements of the frequency-dependent sensitivity of the human hearing have been carried out for different sound-incidence directions by various authors [4], [6], [7], [11]. An "artificial head" can be adapted to these measuring results.

For directional hearing tests which are described in sections 3.2 and 3.3, the replica of a human head was

Directional Hearing Tests by the Aid of an artificial Head

Summary Two probe microphones have been inserted into the ears of a dummy head for shop-windows. The directional hearing ability has been tested with headphones for sound incidence from the vertical and the horizontal plane of this dummy head. It can be managed to determine the direction of sound incidence with this setup. The directional statements for sound incidence from the vertical plane show the greatest deviation. For the vertical plane the localization ability of the natural head has been tested for comparison.

Kopf nachgebildet, und über dieses Modell Messungen des Richtungshörvermögens durchgeführt. Es sollte insbesondere gezeigt werden, inwieweit auf diese Weise Richtungen der Scheitellebene unterschieden werden können (vgl. [8], [9], [12], [13]).

2. Nachbildung eines menschlichen Kopfes

Für die Kopfnachbildung wurde von dem Gipskopf einer Schaufensterpuppe ausgegangen (Abb. 1). Ein menschlicher Kopf mit den Abmessungen des Kunstkopfes müßte akustisch als etwa normal bezeichnet werden. Das läßt sich mit Hilfe seiner abnehmbaren Perücke nachweisen. Auch die Lage der Ohrmuscheln am Kopf sowie ihre Größe und Schrägstellung stimmen gut. Das Gipsmaterial ist mit einer glatten Farbschicht überzogen, so daß die Oberfläche im Hörfrequenzbereich als schallhart angesehen werden kann. Die Perücke besteht aus miteinander verklebten Kunstfasern und hat eine rauhe Oberfläche. Es wird angenommen, daß sie Schall hoher Frequenzen teilweise absorbiert.

In den Ohrmuscheln wurde je ein Loch von 8 mm Durchmesser durch die Kopfwand gebohrt. Da der Gipskopf innen hohl ist (die Wandstärke beträgt etwa 20 mm), konnten durch seinen Hals zwei Sondenrohre eingeführt werden. Diese Rohre sind so gebogen, daß sie von innen in die gebohrten Löcher gesteckt werden konnten. Die Sondenrohre sind mit dem Gips des Kopfes fest verklebt und enden außen in den Ohrmuscheln etwa dort, wo der äußere Ohrkanal beginnen würde. Am anderen Ende der beiden gleich langen Rohre, also außerhalb des Gipskopfes, sitzt je ein Mikrofon (siehe Abb. 1; *Sennheiser*, Typ MD 321). Beide Mikrofone haben annähernd konstante Empfindlichkeit im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 15 kHz (± 2 dB). Darüber hinaus stimmen ihre beiden Frequenzgänge der Empfindlichkeit gut überein. Beides gilt für den Fall stark bedämpfter Sondenrohre. Die Phasenverschiebung ψ der beiden Mikrofonspannungen gegeneinander bei gleichen Empfangsbedingungen und bedämpf-

used and measurements of the directional hearing capacity were carried out on it. In particular, the tests were aimed at determining in this way as to how far the directions in the parietal plane can be differentiated. (Compare [8], [9], [12], [13]).

2. Design of a head phantom

In making a replica of the human head, the gypsum head of a shopwindow dummy (Fig. 1) was taken as a basis. A human head with the dimensions of the artificial head shown in Fig. 1 has to be labelled as about normal. This can be established with the help of the removable wig. Even the location of the external ears on the head as well as their size and inclined position also correspond quite well with natural conditions. The plaster is covered with a layer of glossy paint so that the surface can be regarded as acoustically "hard" in the audio-frequency range. The wig consists of glued artificial fibres and has a rough surface. It is presumed that sound in the higher frequency range is partly absorbed by this wig.

A hole 8 mm in diameter was drilled through the wall of the head in each auricle. Since the interior of the plaster head is hollow (the wall thickness is about 20 mm), two tubular probes were able to be inserted through the neck. These tubes were bent so that they could be inserted from inside into the two holes. The tubular probes are cemented firmly to the plaster head so that their ends are situated in the auricles approximately where the external auditory canal would begin. At the other end of these two equally long tubes, i. e. external to the plaster head, there are two microphones (see Fig. 1; *Sennheiser*, Type MD 321). Both microphones have very nearly constant sensitivity in the frequencies between 50 Hz and 15 kHz (± 2 dB). Beyond this their frequency responses still correspond very well with regard to sensitivity. This is equally valid in the case of strongly attenuated probes. The phase-shift ψ of the two microphone voltages with

1

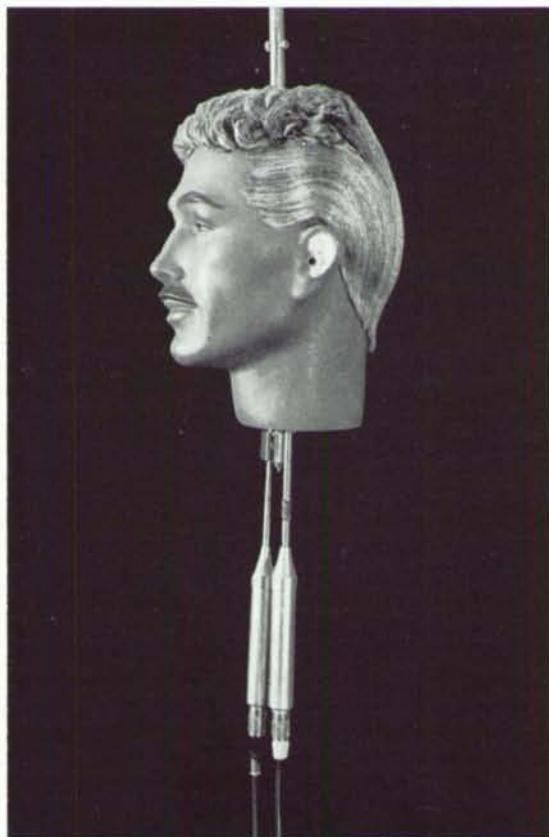


Abb. 1 Die verwendete Kopfnachbildung

Fig. 1 The head phantom used

ten Sondenrohren ist für Sinustöne mit Frequenzen bis 10 kHz gering. Es ist $|\psi| < 20^\circ$ oder $\cos \psi > 0,94$. Im Kunstkopf wurden die Sondenrohre mit Hilfe von ca. 3 mm langen, zylinderförmigen Filzstopfen bedämpft. Die Filzstopfen sind vom Ohr aus in die Rohre hineingeschoben. Vor dem so nachgebildeten »Trommelfell« entsteht ein Resonator. Durch die Lage des Filzstopfens und seine Länge kann das Resonanzmaximum für eine von vorn einfallende ebene Welle (Erhebungswinkel $\theta = 0^\circ$ und horizontal gemessener Winkel $\varphi = 0^\circ$) so gelegt werden, daß sich bis 5 kHz Übereinstimmung mit Messungen am menschlichen Kopf ergibt (Abb. 2 Resonanz bei 3,5 kHz). Der hier beschriebene Kopf wurde Meßergebnissen von *Jahn* und *Vogelsang* angepaßt [7].

Weiterhin störte noch eine schlechte Übereinstimmung mit den von *Jahn* und *Vogelsang* gemessenen Werten bei Frequenzen um 8 kHz. Der Kunstkopf war in die-

Abb. 2 Spannung an beiden eingebauten Ohrmikrofonen als Funktion der Frequenz. Der Schalldruck der einfallenden ebenen Welle war frequenzunabhängig. Ihre Einfallsrichtung wurde verändert:

a) in der Horizontalebene (φ):

$$\theta = 0^\circ, 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

b) in der Scheitalebene (θ):

$$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ, \varphi = 0^\circ \text{ und } 180^\circ$$

Die eingetragen Punkte sind an natürlichen Köpfen gefundene Meßergebnisse von *Jahn* und *Vogelsang*.

Fig. 2 Voltage at both built-in microphones as a function of the frequency. The sound pressure of the impinging planar wave was independent of the frequency. Its direction of incidence was changed:

a) in the horizontal plane (φ):

$$\theta = 0^\circ, 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

b) in the parietal plane (θ):

$$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ, \varphi = 0^\circ \text{ and } 180^\circ$$

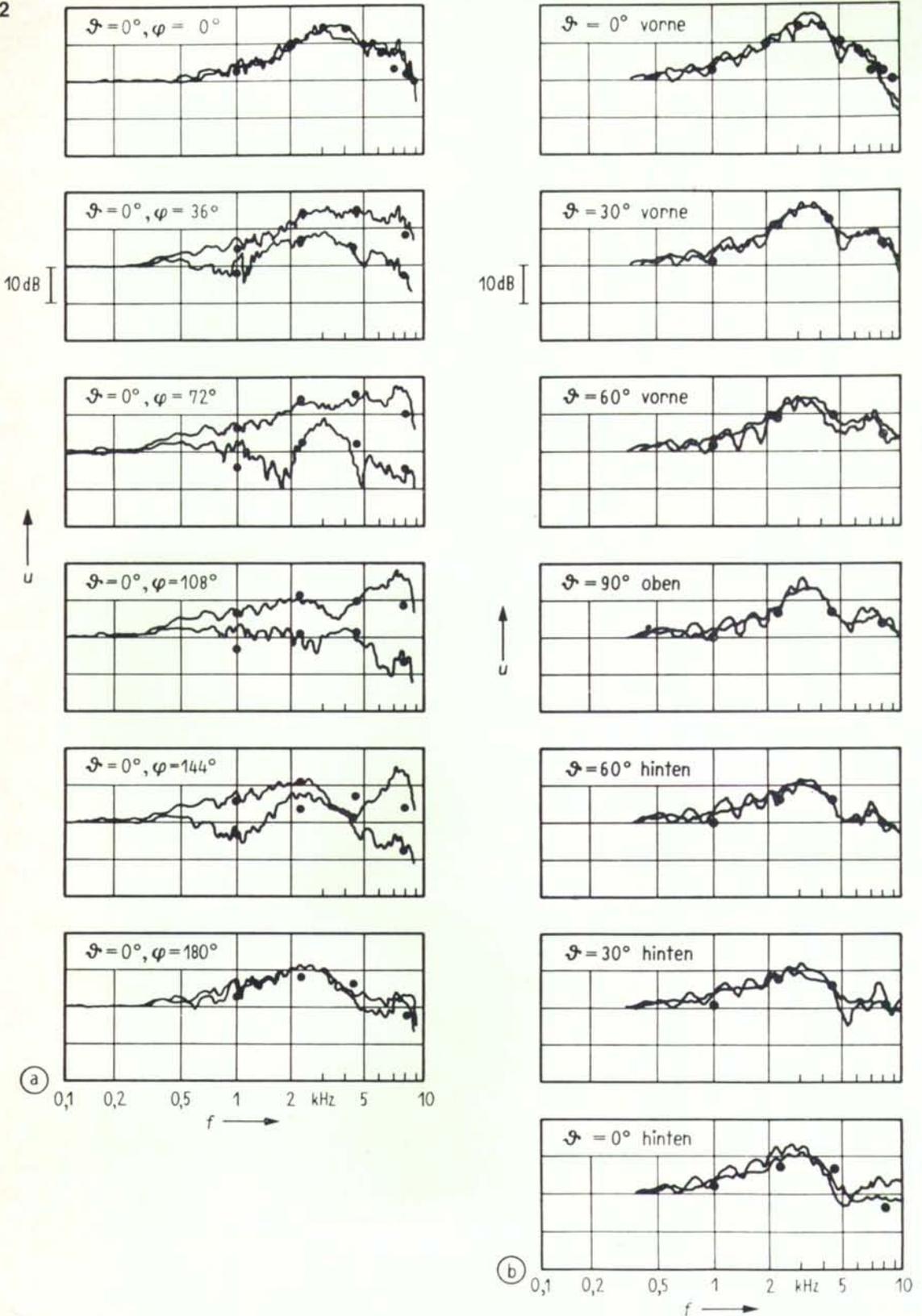
The points plotted are the measuring results obtained using the human head by *Jahn* and *Vogelsang*.

respect to one another under the same reception conditions and with attenuated probes is small for sine-wave tones with frequencies up to 10 kHz. It amounts to $|\psi| < 20^\circ$ or $\cos \psi > 0,94$.

The tubular probes in the artificial head are attenuated by the use of approximately 3 mm long cylindrical felt plugs. These felt plugs are slipped into the tubes from the ear end. A resonator forms in front of this simulated "ear drum". Through the position of the felt plug and its length, the maximum resonance for a flat wave impinging from the front (angle of elevation $\theta = 0^\circ$ and horizontally measured angle $\varphi = 0^\circ$) can be located so that, up to 5 kHz, conformity with tests on the human head is obtained (Fig. 2 resonance at 3.5 kHz). The head described here was matched against test results obtained by *Jahn* and *Vogelsang* [7].

However, at frequencies of about 8 kHz, conformity with the values measured by *Jahn* and *Vogelsang* was

2



sem Frequenzgebiet um etwa 10 dB zu empfindlich. Deshalb wurde schrittweise mit einer rotierenden Raspel das massive Ohr etwas seiner natürlichen Form entsprechend nach hinten hin ausgehöhlt. So wurde nach und nach der Frequenzgang in Abb. 2 für $\theta = 0^\circ$ und $\varphi = 0^\circ$ approximiert. Die einzelnen Fältelungen der Innenseite der Ohrmuschel konnten leider bei dieser Methode nicht berücksichtigt werden.

Beim späteren Bau eines zweiten Kunstkopfes wurden statt Gipsöhren genau nachgebildete menschliche Ohren aus Kunststoff in den Schaufensterpuppenkopf eingeleimt. Sie wurden uns freundlicherweise von Herrn Dr. Plenge vom Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung in Berlin zur Verfügung gestellt. Diese Ohren enthalten die natürlichen Fältelungen der Ohrmuschel, welche das Übertragungsmaß für Schallanteile mit Frequenzen oberhalb 4 bis 5 kHz beeinflussen. Mit diesen Ohrmuscheln und der Filzstopfenabstimmung im Ohrkanal ergab sich ausgezeichnete Übereinstimmung der Frequenzgänge der Ohrempfindlichkeit mit den Meßergebnissen von *Jahn* und *Vogelsang* [7] bis 8 kHz. Für Frequenzen, die oberhalb 8 bis 10 kHz liegen, erscheint es sinnlos, eine genaue Anpassung an Meßergebnisse von natürlichen Ohren anzustreben, da die individuellen Streuungen der Frequenzgänge in diesem Frequenzbereich groß sind [6], [4]. Dies ergibt sich auch aus durchgeführten Phasemessungen am Kunstkopf der Abb. 1, über die an anderer Stelle berichtet wird [14]. Die Kunstkopf-Messungen, über die in dieser Arbeit berichtet wird, sind alle mit dem in Abb. 1 abgebildeten Kopf durchgeführt.

Abschließend wurden die Frequenzgänge beider Kunstkopfohren für andere Schalleinfallrichtungen gemessen (Abb. 2). Die Übereinstimmung mit den Messungen von *Jahn* und *Vogelsang* (Punkte in Abb. 2) kann zumindest bis etwa 6 kHz gut genannt werden. Nach Messungen von *Wiener* und *Ross* [6] lassen sich wahrscheinlich Personen finden, deren Kopf-Frequenzgänge mit denen des Kunstkopfes übereinstimmen. Nach einer durchgeführten Korrelationsmessung können die für seitliche Schalleinfallrichtungen auftretenden interauralen Phasenunterschiede des Kunstkopfes in guter Näherung als Laufzeiten gedeutet werden, welche weitgehend mit an Menschen gefundenen Meßergebnissen übereinstimmen.

3. Richtungshörversuche

Es sollte geprüft werden, inwieweit mit dieser Nachbildung eines menschlichen Kopfes über Kopfhörer ein Richtungshören möglich ist. Messungen des Richtungsvermögens des Menschen für Schalleinfall aus der Horizontalebene sind bekannt [8], [9]. Eine

poor. In this frequency range the artificial head was about 10 dB too sensitive. The solid ear was therefore hollowed out step by step to its natural form towards the rear with a rotating rasp. The frequency response was thus gradually approximated to that given in Fig. 2 for $\theta = 0^\circ$ and $\varphi = 0^\circ$. The individual folds inside the auricles could unfortunately not be taken into account by this method.

In the later construction of a second artificial head, exact replicas of human ears were made of plastic and glued onto the head of the shopwindow dummy in place of the plaster ears. They were kindly placed at our disposal by Dr. Plenge of the Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung (Heinrich Hertz Institute for Vibration Research) in Berlin. These ears possess the natural folds of the auricles which affect the transmission factor of sound components for frequencies above 4 and 5 kHz. Using these auricles and by adjusting the felt plugs in the auditory canals, excellent conformity with the test results obtained by *Jahn* and *Vogelsang* [7] was achieved with respect to the frequency response of the ear sensitivity up to 8 kHz. For frequencies above 8 to 10 kHz, there appears to be no point in striving for exact matching to the measuring results made with the human ear, since the individual acoustic scatter of the frequency response in this frequency range is considerable [6], [4]. This is also revealed by phase measurements carried out on the artificial head shown in Fig. 1, which are reported elsewhere [14]. The tests which are reported in this paper are all carried out on the artificial head as shown in Fig. 1.

Finally the frequency responses of the two artificial ears were measured for other sound directions (Fig. 2). The degree of conformity with the measurements made by *Jahn* and *Vogelsang* (points in Fig. 2) can be regarded as good at least up to about 6 kHz. According to measurements by *Wiener* and *Ross* [6], persons can probably be found who have frequency responses at the eardrum just like those of the artificial head. After carrying out correlative measurements, the interaural phase differences with the artificial head for sound impinging from the side can be interpreted, with good approximation, as transit times which largely conform with the test results obtained on humans.

3. Directional hearing experiments

The task was to determine as to how far directional hearing is possible with a headset using this replica of a human head. Measurements of the ability to identify the direction of sound in humans for an in-

Messung über das natürliche Richtungshörvermögen für Schallquellen in der Scheitelebene wurde zum Zweck eines späteren Vergleiches mit Kunstkopfmessungen durchgeführt.

3.1. Messung mit natürlichem Kopf für die Scheitelebene

Das Richtungshörvermögen wurde mit einer einfachen Versuchsanordnung für Schalleinfall aus der Scheitelebene geprüft. Als Hörer dienten sieben geübte und ungeübte männliche Personen im Alter zwischen zwanzig und dreißig Jahren. Die Versuchsperson wurde in einem reflexionsfreien Raum in passender Höhe horizontal gelagert. Sie lag auf der Seite und konnte auf Wunsch während des Versuches die Seite wechseln, um eine Überanstrengung zu vermeiden. Der Kopf ragte in etwa 1,85 m Höhe über dem Laufnetz des Raumes über die Kante des oberen Tisches hinaus in den Raum und war während des Versuches nicht eingespannt, sondern frei beweglich. Die Versuchsperson erhielt die Anweisung, ihn ruhig in der einmal eingenommenen Lage zu halten. Eine Versuchsreihe dauerte jeweils etwa 10 Minuten. Die Versuchspersonen waren der Ansicht, daß ihr Hörvermögen nicht beeinträchtigt gewesen sei durch die Anspannung, den Kopf gerade halten zu müssen.

Die Anspannung wirkt sich nicht auf die gefundenen Ergebnisse aus. Dies kann man aus einer quantitativen Übereinstimmung der hier gefundenen Meßresultate mit den Ergebnissen einer späteren Messung schließen. Die spätere Messung wurde mit normaler aufrechter Körperhaltung und Bandpaßrauschen von 0,2 bis 6,3 kHz als Signal durchgeführt [15].

Auf eine stets gleiche Kopfhaltung wurde während der Messung geachtet. Die Liege war mit Schluckstoffmaterial und Woldecken abgedeckt, damit sie das freie Schallfeld möglichst wenig störte.

Es wurden keine Lautsprecher verwendet, da die damit verbundenen Übertragungsfehler vermieden werden sollten. Ein Sprecher las aus einer von elf festen Richtungen der Scheitelebene fortlaufenden Text vor. Er bemühte sich, bei allen Richtungen gleichmäßig, gleich laut und in Richtung auf den Kopf der Versuchsperson hin zu sprechen. Die Lautstärke betrug bei allen Messungen etwa 65 phon. Der Mund des Sprechers befand sich in 2,40 m Abstand vom Kopf des Hörers und in guter Näherung auch in dessen Scheitelebene (Abweichung unter 3°).

Die tatsächlichen Schalleinfallrichtungen entsprachen bei normaler Körperhaltung den Erhebungswinkeln $\theta = 0^\circ, 18^\circ, 36^\circ, 54^\circ, 72^\circ$ (jeweils »vorn« beziehungsweise »hinten«) und 90° (»oben«). Der Sprecher

incidence from the "horizontal plane" are well known [8], [9]. A test concerning the natural directional-hearing capacity for sound sources in the "parietal plane" were carried out for the purpose of a later comparison with artificial-head measurements.

3.1 Measurements on the human head in the parietal plane

The directional-hearing capacity was tested with a simple test arrangement for sound incidence in the parietal plane. Seven experienced and inexperienced male persons whose ages ranged between twenty and thirty years were used for the tests. The test person was positioned horizontally at a suitable height in an anechoic room. He lay on his side and could change over to his other side during the test if he wished in order to avoid over-exertion. The head projected into free-space at a height of about 1.85 m above the space-lattice beyond the edge of the supporting table and was not held rigidly during the test but was freely movable. The test person was instructed to lie quietly in the position selected. Each test series lasted about 10 minutes. The test persons were of the opinion that their hearing capacity was not diminished by the strain of having to hold their heads straight.

The exertion did not have any effect on the result obtained. This can be concluded from the quantitative agreement of the results obtained here with the results obtained from a later measurement. The later measurement was undertaken with a person in a normal upright position with band-pass noise of 0.2 to 6.3 kHz as the signal [15].

Care was taken to maintain a constant head position during the test. The table was covered with sound-absorbent material and woollen blankets in order to keep interference to the free sound field as small as possible.

A loudspeaker was not used to avoid the transmission errors associated with it. A speaker read out a continuous text from eleven fixed directions in the parietal plane. He attempted to speak uniformly loud towards the head of the test person from each direction. In all measurements, the loudness level was about 65 phon. The mouth of the speaker was situated at a distance of 2.40 m from the listener's head and also in close proximity to his parietal plane (deviations of less than 3°).

The actual directions of sound incidence corresponded with the angles of elevation $\theta = 0^\circ, 18^\circ, 36^\circ, 54^\circ, 72^\circ$ (either "front" or "rear") and 90° ("above") with the normal body position. The speaker always stood

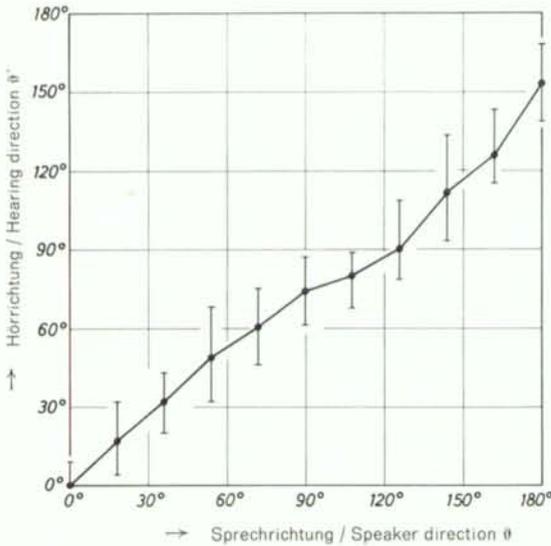


Abb. 3 Zusammenhang zwischen tatsächlicher Schalleinfallrichtung (θ) und angegebener Hörrichtung (θ') für Schalleinfall aus der Scheitelebene. Gemessen mit natürlichem Kopf.

Fig. 3 Relationship between the factual sound incidence direction (θ) and the stated hearing-direction (θ') for sound incidence in the parietal plane. Measured on the human head.

stand stets genau vor einem von elf fortlaufend nummerierten Lautsprechern, die im benutzten reflexionsfreien Raum aufgehängt sind. Den elf Richtungen der Scheitelebene entsprachen die Lautsprechernummern 10 bis 20. Die Versuchspersonen konnten sich in der Zuordnung von Lautsprecherrichtungen und Raumrichtungen gut aus. Sie wußten, daß nur aus Richtungen des »oberen Halbraumes« gesprochen wurde.

Vor Beginn jeder Beurteilung schaltete die Versuchsperson ein Störgeräusch ein (Rauschen aus einem Lautsprecher an der Decke des Raumes). Die Augen hielt sie während des ganzen Versuches geschlossen. Während das Störgeräusch eingeschaltet war, begann der Sprecher, in einer der elf Positionen zu lesen. Daraufhin schaltete die Versuchsperson das Störgeräusch ab. So war sichergestellt, daß sie den Standort des Sprechers nur an dessen Sprache erkannte.

Sie hatte nun beliebig viel Zeit, um zu einem Urteil zu gelangen. Im Mittel wurde nach etwa einer Minute eine der elf möglichen Richtungen in Form einer Lautsprechernummer angegeben. Bei erneut eingeschaltetem Störgeräusch nahm der Sprecher eine neue Position ein und berücksichtigte dabei die elf Positionen gleich häufig und in möglichst statistischer Reihenfolge.

exactly in front of one of eleven consecutively numbered loudspeakers which are suspended in the anechoic room. The loudspeaker numbers from 10 to 20 corresponded with the eleven directions of the parietal plane. The test persons were quite familiar with the way in which the loudspeaker directions and the various spatial positions were correlated. They knew that the voice would only come from directions in the "upper semi space".

Before the commencement of each assessment, the test person switched on a masking noise (noise from a ceiling-mounted loud-speaker). The test person kept his eyes closed during the whole experiment. Whilst the noise was still switched on, the speaker started to read from one of the eleven positions, upon which the listener switched off the masking noise. This ensured that he could only recognise the position of the speaker from his voice.

He had now as much time as he liked to form his judgement. As a rule, after about a minute, the listener indicated one of the eleven possible directions in the form of a loudspeaker number. Then the noise was switched on again and the speaker took up a new position, taking care to occupy each position no more

Das Versuchsergebnis ist in Abb. 3 dargestellt. Als Abszisse ist der tatsächliche Schalleinfallswinkel in der Scheitelebene gewählt. Er wird als Erhebungswinkel θ der Schallquelle bezeichnet. Über jeder Sprechrichtung ist als Hörwinkel der Zentralwert (50%-Punkt) der jeweils aus den Angaben gefundenen Richtungsverteilung eingetragen. Der Zentralwert wurde aus der Häufigkeitssumme von 25 Antworten graphisch ermittelt. Außerdem sind die wahrscheinlichen Fehler (25% und 75%-Punkte der Verteilung) in das Diagramm eingetragen [10]. Nach dieser Messung ist der Hörwinkel weitgehend gleich dem tatsächlichen Schalleinfallswinkel. Eine exakte Richtungsbestimmung ergäbe in Abb. 3 die Winkelhalbierende der Koordinatenachsen als Meßergebnis. Die durch die Meßpunkte gezeichnete Kurve verläuft etwas flacher. Der gefundene wahrscheinliche Fehler beträgt im Mittel $\pm 14^\circ$. Er zeigt die Schwierigkeit der Richtungsbestimmung für die Scheitelebene. Gegenüber einer Auftragung des arithmetischen Mittelwertes ist bei Auftragung des Zentralwertes die Beschränkung der Antwortmöglichkeiten auf den oberen Halbraum ohne Einfluß auf das Meßergebnis.

Ähnlich wie bei der hier gewählten Versuchsanordnung – etwa durch die seitliche Hörerlage – lassen sich auch bei anderen Anordnungen unbeabsichtigte psychologische Nebenwirkungen nicht von vornherein ausschließen. Dies gilt insbesondere auch für eine Kopfeinspannung, die bei dieser Messung nicht vorgenommen wurde.

3.2. Messung über Kunstkopf für die Scheitelebene

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Messung wurde in ähnlicher Weise unter Benutzung des Kunstkopfes wiederholt. Dazu war im reflexionsfreien Raum der Kunstkopf so eingespannt, daß er sich in der gleichen Lage und an der gleichen Stelle befand wie vorher die Köpfe der Versuchspersonen. Die Ohrsignale des Kunstkopfes wurden über rauscharme Vorverstärker und weitere Verstärker einem Kopfhörerpaar zugeführt (*Telefunken*, Typ T 50). Der Sprecher im reflexionsfreien Raum und die Versuchsperson, die sich jetzt außerhalb befand, wiederholten in der oben beschriebenen Weise den Richtungshörversuch (siehe Abschnitt 3.1.). Sie verständigten sich mit Hilfe einer Gegensprechanlage.

Aus einem Vorversuch ging hervor, daß eine Unterscheidung der Sprechrichtungen über den Kunstkopf wesentlich schwieriger war als beim Hören mit dem eigenen Kopf. Es sollte gezeigt werden, daß eine Unterscheidung von Richtungen der Scheitelebene aber *möglich* ist. Daher wurden für diese Messung nur zwei

often than the others and as near to a statistical sequence as possible.

The results of the experiment are shown in Fig. 3. The actual angle of sound incidence in the parietal plane is chosen as the abscissa. It is referred to as the angle of elevation θ of the sound source. The directional distribution obtained from the data is plotted as the hearing angle of the central value (50% point) for each speech direction. The central value was determined graphically from the sum of the distribution of 25 answers. In addition, the probable errors (25% and 75% points of the distribution) are plotted on the diagram [10]. According to this test, the hearing angle is very much the same as the actual sound-incidence angle. An exact directional determination would give in Fig. 3 the angle bisector of the coordinates as the measuring result. The curve traced through the measuring points shows a somewhat flatter course. The probable error discovered amounted on average to $\pm 14^\circ$. This shows the difficulty of directional determination in the parietal plane.

When plotting the central value instead of the arithmetical average value, the restriction of the possible answers to the upper half of the room does not affect the test result.

Similar to what occurs with the test arrangement selected here – lateral receiver position – unintentional psychological side-effects can not be excluded using other arrangements either. This also occurs with head clamping which was not carried out for this measurement.

3.2 Measurements on the artificial head in the parietal plane

The test described in the previous section was repeated in a similar manner using the artificial head. For this purpose, the artificial head was fixed in the same position in the anechoic room and at the same point at which the heads of the test persons were previously situated. The signals received at the ears of the artificial head were fed via low-noise pre-amplifiers and further amplifiers to a pair of headphones (*Telefunken*, type T 50). The speaker in the anechoic room and the test person, who was now outside the room, repeated the directional hearing experiment in the manner described above (see section 3.1.). They communicated with each other using an intercom system.

A preliminary trial revealed that differentiation between the speaker directions via the artificial head was considerably more difficult than when listening directly. However, the attempt was to be made to show that a differentiation of the directions in the parietal

geübte Versuchspersonen verwendet. Diese erhielten außerdem noch vor Beginn einer jeden Meßreihe Gelegenheit, sich den Sprecher einmal »von vorn« und einmal »von hinten« kurz anzuhören, um sich die Klangbilder einprägen zu können. Im Vorversuch hatte sich gezeigt, daß die Hörer sonst erst nach Ablauf von etwa einer halben Meßreihe im Urteil sicherer wurden. Die Urteilsbildung war bei diesem Versuch schwieriger; daher dauerte jede Meßreihe etwa 20 Minuten. Zwischen den einzelnen Meßreihen wurden lange Pausen eingelegt.

Das Meßergebnis ist in der gleichen Form wie bei Abb. 3 in Abb. 4 aufgetragen (durchgezogene Kurve). Jeder eingetragene Meßpunkt ist wieder aus 25 Urteilen bestimmt. Die Hörwinkel aus beiden Messungen (gestrichelte und durchgezogene Kurve in Abb. 4) stimmen bis auf eine Ausnahme (»hinten«) weitgehend überein. Bei der Messung über Kunstkopf und Kopfhörer ist dagegen der wahrscheinliche Fehler wesentlich höher.

Die Angabe der Hörrichtungen fiel den Versuchspersonen schwer. Es entstand kein »scharfes Bild« der Schallquelle, nach dem sie spontan hätten urteilen können. In jedem Fall wurde der Klang der Sprache als

plane ist *possible*. For this test, therefore, only two experienced test persons were used. Before the start of each test series they were additionally given the opportunity of hearing the speaker briefly once "from the front" and once "from the rear" in order to memorize the acoustic impressions. The preliminary trial had shown that otherwise the listener showed confidence in his judgement only after half a test series. In this test, the formation of judgement was more difficult, so that each test series lasted about 20 minutes. Long pauses were waited between each series of tests.

The test results are plotted in the same way as in Fig. 3 and Fig. 4 (continuous curve). Each plotted measuring point is again determined from 25 assessments. The hearing angles from both measurements (dotted and continuous curves in Fig. 4) agree to a considerable extent, with one exception ("rear"). On the other hand, with the measurement using the artificial head and headphones, the probable error is considerably higher.

The test persons found it difficult to determine the hearing direction. There was no "sharp" picture of the sound source enabling the listeners to make a

4

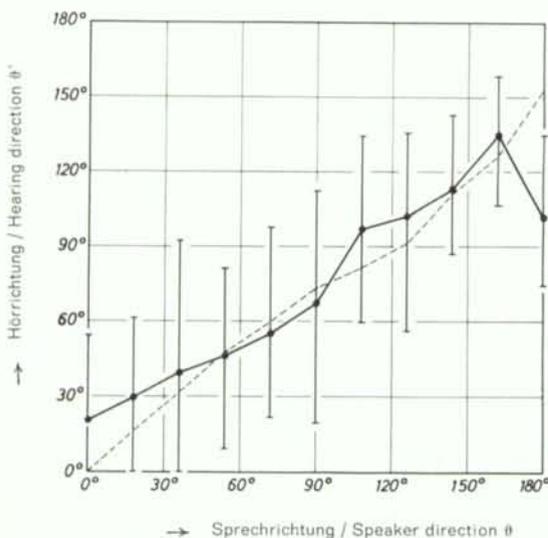


Abb. 4 Zusammenhang zwischen tatsächlicher Schalleinfallrichtung (θ) und angegebener Hörrichtung (θ') für Schalleinfall aus der Schellebene. Durchgezogene Kurve: Messung über Kunstkopf. Gestrichelte Kurve: Messung mit natürlichem Kopf nach Abb. 3.

Fig. 4 Relationship between the factual sound-incidence direction (θ) and the stated hearing-direction (θ') for sound incidence in the parietal plane. Continuous curve: Measurements via the artificial head. Dotted curve: Measurements on the human head as in Fig. 3.

Kriterium für die Urteilsfindung mit benutzt. Bei Schalleinfall von hinten war zu bemerken, daß die Stimme des Sprechers »belegt« wirkte; hochfrequente Anteile der Konsonanten waren nicht stark ausgeprägt. Bei Schalleinfall von vorn hörte sich die Stimme des Sprechers deutlicher und scheinbar »näher« an als von hinten (vergleiche [13]).

Diese Klangunterschiede scheinen nach dem Meßergebnis charakteristisch genug zu sein, um nach einiger Übung mit ihrer Hilfe eine Richtungsangabe in der Scheitelenebene durchführen zu können. Es ist damit zu rechnen, daß der große wahrscheinliche Fehler dieser Messung durch folgende Verbesserungen verringert werden kann:

- individuelle Anpassung des Kunstkopfes an den Kopf des jeweiligen Hörers für alle Schalleinfallrichtungen,
- Gewöhnung der Hörer an die Versuchsbedingungen sowie längere Übung,
- Verbesserung der Übertragungseigenschaften der elektroakustischen Wandler.

Die gefundenen Ergebnisse stehen nicht im Widerspruch zu Angaben von *de Boer* und *Vermeulen*; der Einbau

spontaneous decision. In each case, the timbre of the voice was also used as a criterion for the decision. With the sound impinging from the rear, it was noticeable that the voice of the speaker appeared "muffled"; high-frequency components of the consonants were not very distinct. In sound incidence from the front, the voice of the speaker was heard more clearly and apparently "closer" compared with sound from the rear [13].

These tonal differences appear characteristic enough from the measuring results in order to enable direction finding in the parietal plane. It is to be expected that the main probable errors in this measurement can be reduced by the following improvements:

- individual adaptation of the artificial head to the head of the listener concerned for all sound incidence directions,
- accustoming the listener to the test requirements as well as lengthy practice,
- improvement of the transmission characteristics of the electro-acoustic transducers.

The results obtained are not incompatible with the data obtained by *de Boer* and *Vermeulen*; the fixing of the

5

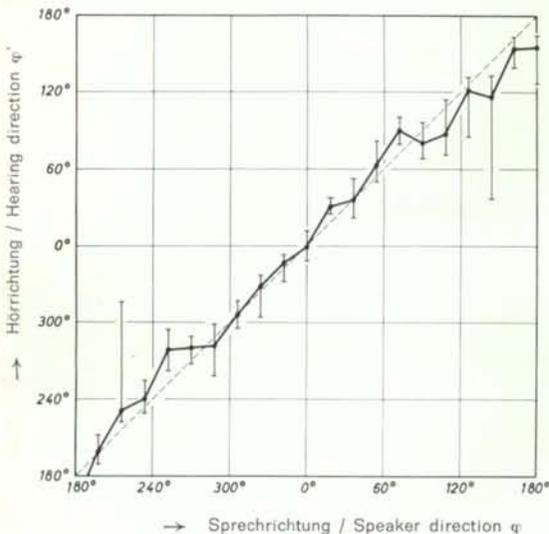


Abb. 5 Zusammenhang zwischen tatsächlicher Schalleinfallrichtung (ψ) und angegebener Hörriichtung (ψ') für Schalleinfall aus der Horizontalebene. Gemessen über Kunstkopf. Gestrichelt eingetragen ist die Winkelhalbierende der Koordinatenachsen.

Fig. 5 Relationship between the factual sound-incidence direction (ψ) and the stated hearing-direction (ψ') for sound incidence in the horizontal plane. Measured via artificial head. The angle bisector of the system of coordinates is shown dotted.

der Mikrofone in den Kopf einer Schaufensterpuppe (vgl. [3] dort Abb. 5) wich von dem hier beschriebenen Verfahren wesentlich ab (Abschnitt 2).

3.3. Messung über Kunstkopf für die Horizontalebene

Weiter wurde mit zwei geübten Versuchspersonen auch für Schalleinfall aus der Horizontalebene eine Messung des Zusammenhangs zwischen wahrgenommenem und tatsächlichem Schalleinfallswinkel vorgenommen. Die Messung erfolgte wieder nach dem in den Abschnitten 3.1. und 3.2. beschriebenen Verfahren. Der Kunstkopf hing jedoch aufrecht im reflexionsfreien Raum.

Abb. 5 zeigt das Meßergebnis. Winkel zwischen 0° und 180° entsprechen Schalleinfall von links, solche zwischen 180° und 360° Schalleinfall von rechts. Der Winkel 0° entspricht der Schalleinfallrichtung »vorn«. Jeder Meßpunkt wurde aus 18 Urteilen ermittelt. Die Zeit bis zur Urteilsabgabe betrug bei dieser Messung im Mittel eine Minute.

Eine am Meßergebnis zunächst erkennbare, geringfügige Verdrehung des Kopfes gegenüber dem für die Richtungsangaben gewählten Koordinatensystem ist aus Abb. 5 eliminiert. Abb. 5 zeigt, daß mit einem mittleren wahrscheinlichen Fehler von $\pm 17^\circ$ eine Richtungsangabe möglich ist. Dies gilt nicht für seitliche Einfallrichtungen zwischen 70° und 110° sowie zwischen 250° und 300° (vgl. dazu [5] und [9]). Eine exakte Richtungsbestimmung ergäbe wieder die gestrichelt eingezeichnete Winkelhalbierende der Koordinatenachsen als Meßergebnis. Die Unterscheidung zwischen vorn und hinten war hier besser möglich als bei der Messung für die Scheitelebene. Dies liegt an der Beschränkung auf horizontale Schalleinfallrichtungen. Nach Abb. 4 wurden bei Schalleinfall von vorn oder hinten oft andere Richtungen der Scheitelebene angegeben, da sie sich subjektiv nur geringfügig von diesen Richtungen unterscheiden. Bei Beschränkung auf die Horizontalebene (Abb. 5) entfallen diese Richtungen.

Neben zufälligen Fehlern trat bei dieser Messung ein systematischer Fehler auf. Es kamen Vertauschungen zwischen Richtungen vor, welche spiegelbildlich zur Achse durch die beiden Ohren liegen. Diese Vertauschung kam bei 216° in 39% und bei 144° in 33% aller Fälle vor. Das führte für diese Richtungen zu den großen angegebenen wahrscheinlichen Fehlern. Bei den Richtungen »vorn« und »hinten« waren die Hörrichtungen verschwommen und hatten große Erhebungswinkel. Es war aber gut möglich, die beiden Richtungen auf-

microphones in the head of a shopwindow dummy (compare [3] and Fig. 5) is very different from the method described here (section 2).

3.3 Measurements on the artificial head in the horizontal plane

A measurement was further carried out with two experienced test persons on the relationship between the perceived and actual sound-incidence angle in the horizontal plane. The measurement was again undertaken according to the methods described in sections 3.1 and 3.2. The artificial head was, however, suspended upright in the anechoic room.

Fig. 5 shows the test result. Angles between 0° and 180° correspond to sound incidence from the left, and those between 180° and 360° to sound incidence from the right. The angle 0° corresponds to sound incidence from the "front". Each test point was determined from 18 decisions. In this measurement the time to make a decision averaged one minute.

First, a slight rotation of the head, which influenced the test result compared with the selected coordinate system for the directional data, is eliminated from Fig. 5. Fig. 5 shows that with a mean probable error of $\pm 17^\circ$, a directional indication is possible. This does not apply to incidence directions from the side between 70° and 110° or between 250° and 300° (compare [5] and [9]). An exact determination of direction would again give the indicated dotted angle-bisector of the system of coordinates as the test result. Here, the differentiation between front and rear was more easily possible than with the measurement in the parietal plane. This was due to the limitation of the horizontal sound-incidence directions. According to Fig. 4, other directions in the parietal plane were often given in sound incidence from the front or rear, since subjectively they only differ very slightly from these directions. However, when limited to the horizontal plane, these directions do not apply (Fig. 5).

Apart from accidental errors, one particular systematic error occurred during this measurement, i. e. the directions which were symmetrically opposed to one another on the axis running through both ears were confused. This reversal occurred at 216° in 39%, and at 144° in 33% of all cases. This gave the probable great errors indicated for these directions. For the directions "front" and "rear", the hearing directions were hazy and had large angles of elevation. It was, however, certainly possible to distinguish between the two directions on

grund spektraler Unterschiede voneinander zu unterscheiden. Bei allen anderen Einfallrichtungen wurden nicht einzelne richtungsbestimmende Kriterien zur Urteilsbildung benutzt, sondern es trat ein fast natürlicher Richtungseindruck auf. Die Schallquellen wurden sowohl mit dem richtigen Erhebungswinkel als auch mit dem richtigen Seitenwinkel wahrgenommen. So war eine spontane Richtungsangabe möglich.

the basis of spectral differences. For all other incidence directions, no single direction-determined criterion was used in forming a judgement; on the contrary, an almost natural directional impression was gained. The sound sources were perceived with the correct angle of elevation as well as with the correct side angle. In this way, a spontaneous appraisal of the direction was possible.

Literatur / References

- [1] Franssen, N. V., Stereophonie, Philips techn. Bibliothek, Eindhoven [1963]
- [2] Meyer, E., Schodder, G. R., Nachr. Akad. Wiss., Göttingen [1952], 31
- [3] de Boer, K., Vermeulen, R., Philips techn. Rdsch. 4 [1939], 329
- [4] Schürmer, W., Hochfrequ. u. Elektroakust. 72 [1963], 39
- [5] Rimski-Korsakov, A. V., 4th International Congress on Acoustics, Copenhagen [1962], H57
- [6] Wiener, F. M., Ross, D. A., J. Acoust. Soc. Amer. 18 [1946], 401
Wiener, F. M., J. Acoust. Soc. Amer. 19 [1947], 143
- [7] Jahn, G., Vogelsang, S., Hochfrequ. u. Elektroakust. 68 [1959], 50
Jahn, G., Hochfrequ. u. Elektroakust. 69 [1960], 75
- [8] Schmidt, P. H., et al., Acta Physiol. Pharmacol. Neerl. 3 [1953], 2
- [9] Mills, A. W., J. Acoust. Soc. Amer. 30 [1958], 237
- [10] Feldtkeller, R., Zwicker, E., Das Ohr als Nachrichtenempfänger, Hirzel-Verlag, Stuttgart, 2. Auflage [1967], Seite 50
- [11] Shaw, E. A. G. and Teranishi, R., J. Acoust. Soc. Amer. 44 [1968], 240, 257
- [12] Roffler, S. K. and Butler, R. A., J. Acoust. Soc. Amer. 43 [1968], 1255, 1260
- [13] Blauert, J., Untersuchungen zum Richtungshören in der Medianebene bei fixiertem Kopf. Dissertation Aachen [1969]
- [14] Damaske, P., Mellert, V., Acustica 22 [1969/70], 153
- [15] Damaske, P., Acustica 22 [1969/70], 191.



Ohr und Hörvorgang

Diese mehrfarbig gedruckte Darstellung des Sinnesorganes Ohr ist wieder lieferbar zum Preis von DM 32,- netto ab Verlagslager.

Format 84 mal 119 cm, auf Leinwand aufgezogen. Im Preis enthalten ist eine 16 Druckseiten und 6 Abbildungen umfassende Erläuterung.

Zu beziehen direkt vom
median-verlag, 69 Heidelberg 1, Postfach 1750