Messung des Diffusfeldübertragungsmaßes von Kopfhörern am Kunstkopf

von J. Schröter*
Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Akustik, Ruhr-Universität Bochum
G. Spikofski und G. Theile
Institut für Rundfunktechnik GmbH, München

Zusammenfassung

Die bisher verwendete Methode, Übertragungsmaße von Kopfhörern zu bestimmen, ist der nach DIN 45619 genormte Lautstärkevergleich. In letzter Zeit existieren Bestrebungen, diese psychophysikalische Methode durch eine rein physikalische Methode (Sondenmethode an Versuchspersonen) zu ersetzen. Dieser Aufsatz geht in dieser Richtung noch einen Schritt weiter: es wird über Messungen des Diffusfeldübertragungsmaßes von Kopfhörern mit einem Kunstkopf berichtet. Es wird gezeigt, daß die Verwendung eines Ohrsimulators (Nachbildung der akustischen Trommelfellimpedanz) vermieden werden kann, oder, falls ein solcher doch verwendet wird, daß seine Genauigkeit keine Rolle spielt. Es wird vorgeschlagen, durch austauschbare Ohrmuscheln verschiedene Außenohren nachzubilden, die die hauptsächliche Ursache für die systematischen Abweichungen zwischen Versuchspersonen darstellen.

Measurement of diffuse-field sensitivity level of headphones on a dummy-head

Summary

The currently used method of measuring sensitivity levels of headphones is the loudness comparison method according to DIN 45619. Lately, there have been efforts to replace this psychophysical method by a purely physical one (probe-tube microphone method applied to human subjects). This paper goes one step further in this direction: It describes a method as well as data on the measurement of random-incidence sensitivity levels of headphones using a dummy-head. We show that in doing so we may bypass the use of an ear simulator (realization of the acoustical eardrum impedance), and, should we decide to use one, its accuracy is not important. It is being suggested to use interchangeable pinnae on dummy-heads to simulate different outer ears which have been identified to cause the systematic differences between human subjects.

Mesure à la tête artificielle de la sensibilité des écouteurs en champs diffus

Sommaire

La méthode actuellement la plus utilisée pour déterminer le niveau de sensibilité des écouteurs repose sur des comparaisons subjectives de sonies (norme DIN 45619). On note cependant une tendance récente à substituer aux méthodes psycho-physiques des méthodes purement physiques utilisant notamment des sondes microphoniques placées dans le conduit auditif des personnes testées.

On propose ici d'aller encore un peu plus loin dans cette direction et on présente des mesures concernant des casques à écouteurs placés directement sur une tête artificielle. Cette méthode a le premier avantage d'éviter l'utilisation d'une simulateur d'oreille, c'est-à-dire d'un appareil spécial reproduisant l'impédance acoustique du tympan. Si néanmoins on fait intervenir une tel simulateur, son exactitude ne jouera aucun rôle et ne risquera pas de compromettre la valeur des mesures effectuées. On conclut en proposant de compléter le dispositif avec un jeu de pavillons amovibles destinés à simuler les différents types d'oreilles externes qui constituent la source principale des écarts systématiques entre les différents sujets testés.

1. Einleitung

Das Übertragungsverhalten von Kopfhörern wird z.Z. nach [1, 2] im freien Schallfeld bestimmt. Bestandteil beider Normenteile ist der Lautstärkervergleich zwischen dem zu untersuchenden Kopfhörer und einer Referenzquelle, die in [1] durch einen vorne befindlichen Lautsprecher im reflexionsarmen Meßraum, in [2] durch einen Bezugskopfhörer mit bekannten Übertragungseigenschaften gebildet wird. Jedoch wird in der Praxis das nach [1, 2] gemessene Freifeldübertragungsmaß nicht für die Kopfhörer-Beurteilung herangezogen, sondern ausschließlich subjektive Gütebeurteilungstests. Man hat erkannt, daß Kopfhörer mit „ebenen Freifeldübertragungsmaß nach DIN 45619" weder einheitliche noch zufriedenstellende Klangeigenschaften besitzen [3]; und besonders aus diesem Grunde läßt die DIN 45500, Teil 10 [4] ein Toleranzfeld zu, das im wichtigen Frequenzbereich zwischen 10 und 13 dB

* Z.Z. bei AT & T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey, USA.

breit ist. Der Wunsch nach der Definition eines Kopfhörerübertragungsmaßes, das eine „fehlerfreie Reproduktion der Klangfarbe" gewährleistet, ist mit dem derzeitigen Meßstandard nicht erfüllt [3, 5–7].

Zunächst durch Fortschritte der Kunstkopftechnik initiiert (siehe z.B. [8–10]), hat sich aber inzwischen ein starkes Interesse an der Definition eines „objektiv richtigen" Kopfhörerübertragungsmaßes ergeben. Grund dafür war die Sorge, daß die Abbildungseigenschaften eines Kunstkopfsystems, das mit Einführung der Kunstkopfstereofonie im Rundfunk weite Verbreitung erlangen sollte, durch zu weite Toleranzen auf der Kopfhörerseite verschlechtert werden könnten [9, 11, 12].

Aber auch für die Wiedergabe von üblichem stereofonen Programmaterial über Kopfhörer besteht ein wachsendes Interesse an einem neuen Meßstandard für Kopfhörerübertragungsmaße, die eine genaue Beurteilung der resultierenden Klangfarben zulassen. Das Toleranzfeld könnte dann wesentlich enger ausfallen als bisher. Insbesondere für hochwertige Studiokopfhörer wird die Festlegung von Mindestanforderungen angestrebt, die die Reproduktion eines einheitlichen und unverfälschten Klangbildes gewährleisten [3, 6]. Im Bereich der Studiotechnik könnte dann der Studio-Kopfhörer einen sinnvollen alternativen Abhörstandard darstellen, dies sowohl für den nationalen und internationalen Programmaustausch als auch für die Beurteilung der Tonqualität in standardisierten Hörtests (Kopfhörerwiedergabe wird in CCIR-Recommendation 562-1 empfohlen).

In [7] wird eine Übersicht über die Probleme bei der Bestimmung des „richtigen" Frequenzgangs des Kopfhörerübertragungsmaßes gegeben. Der Autor Tool stellt fest: „There are fundamental differences between the headphone reproductions of dummy-head (binaural) and conventional stereophonic recordings." Im Gegensatz zu Sahr [5] kommt er aber zu dem Schluß, daß das „objektiv richtige" Übertragungsverhalten eines Kopfhörers physikalisch definierbar ist: „The optimum performance must be defined from measurements made on real ears or on a device that in the essential anatomical and acoustical respects closely resembles real ears."

Eine physikalische Definition des „richtigen" Kopfhörer-Frequenzgangs wird in [3, 6] angegeben: Anstelle eines bestimmten richtungsspezifischen Bezugs (Freifeld) wird ein richtungsneutraler Bezug (Diffusfeld) für die Entzerrung zugrundegelegt („Diffusfeldentzerrung"). Diese Abkehr vom ebenen Freifeldübertragungsmaß zugunsten eines ebenen Diffusfeldübertragungsmaßes ist das Ergebnis neuerer Untersuchungen zur Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören [13] und zur Kompatibilität stereofoner Übertragungsverfahren [9, 14].

Die Diffusfeldentzerrung ist zunächst die theoretisch abgeleitete Lösung des Kompatibilitätsproblems, das auftritt, wenn ein Kopfhörer sowohl für kopfbezogene als auch für raumbezogene Signale (Definition der Begriffe in [14]) optimal entzerrt werden soll. Nach Tool [7] verhindert das Kompatibilitätsproblem eine allgemein gültige Definition des „objektiv richtigen" Übertragungsverhaltens eines Kopfhörers: „From the point of view of sound quality, headphones optimized for conventional stereo recordings will be incorrect for dummy-head recordings, and vice versa." Doch eine allgemein gültige Definition ist nach [14] möglich, wenn auch für den Kunstkopf eine Entzerrung zugrundegelegt wird, die bei Lautsprecherwiedergabe Klangfarbenfehler vermeidet. Diese Voraussetzung ist von Tool nicht gemacht worden; die von ihm zugrundegelegten Kunstköpfe sind Meßkunstköpfe, die das Ohrsignal am Trommelfell nachbilden, z.B. Kemar [15].

In [8] wurde gezeigt, daß man in der Kunstkopfstereofonie auf eine Nachbildung der Trommelfellimpedanz verzichten kann. Darauf basierend konnte ein sogenannter Studio-Kunstkopf entwickelt werden, dessen Mikrofonsignale im Hinblick auf „Kompatibilität zur Lautsprecherwiedergabe" entzerrt sind [9, 10]. Dieser Studio-Kunstkopf („KU 81" von Neumann, vgl. [16]) erzeugt im Gegensatz zum KEMAR Mikrofonsignale, die die Ohrsignale weder an den Trommelfellen noch an irgendeiner Stelle der menschlichen Ohrkanäle nachbilden. Die Mikrofonsignale des KU 81 sind vielmehr wie die Signale eines Studio-Mikrofons so entzerrt, daß ein frequenzunabhängiges Diffusfeldübertragungsmaß gemessen wird [16]. Trotz der komplizierten, frequenzabhängigen Richtcharakteristik des Studio-Kunstkopfes werden mit dieser Entzerrung Klangfarbenfehler bei Lautsprecherwiedergabe vermieden.

Die Diffusfeldentzerrung stellt damit die aufnahme- und wiedergabeseitig gültige Lösung des Kompatibilitätsproblems dar, das auftritt, sobald kopfbezogene Signale über Lautsprecher oder raumbezogene Signale über Kopfhörer wiedergegeben werden sollen [14]. Für beide Übertragungsfälle ist abgeleitet worden, daß für die Entzerrung von Kunstköpfen und Kopfhörern nicht eine einzige Bezugsrichtung zugrundegelegt werden darf, sondern daß als „richtungsneutraler Bezug" das Integral über alle Freifeldübertragungsfunktionen des Außenohres zugrundegelegt werden muß, um Klangfarbenfehler zu vermeiden. Das bedeutet meßtechnisch, daß nicht ein bestimmtes Freifeldübertragungsmaß, sondern das Diffusfeldübertragungsmaß

von Kunstkopf und Kopfhörern einen ebenen Frequenzverlauf aufweisen muß. Damit ist ein Kopfhörerübertragungsmaß, das unabhängig von der Aufnahmetechnik eine „objektiv richtige" Ankopplung des Kopfhörers an den Ohrkanaleingang sicherstellt, physikalisch definiert: Das Kopfhörerübertragungsmaß muß gleich dem Außenohrübertragungsmaß im diffusen Schallfeld sein [3, 6].

2. Begründung einer physikalischen Meßtechnik

Die Messung von Übertragungsfunktionen des Außenohres erfolgt z.Z. in allen bekannten Labors ausschließlich mit Hilfe der Sondenmeßtechnik (Übersicht in [17]). Aber auch die Kopfhörerübertragungsmaße (vgl. z.B. [6, 7, 18]) und die Einfügungsdämmaße von Gehörschützern (vgl. z.B. [19–21]), die alle bezogen sind auf Übertragungsfunktionen des Außenohres, werden zunehmend physikalisch gemessen, obwohl die entsprechenden Normen noch psychophysikalische Methoden vorschreiben.

In bezug auf die Kopfhörermeßtechnik schreiben die derzeitigen Normen ([22] sowie [1]) die Methode des Lautstärkevergleichs vor. Dieser Methode liegen zwei unterschiedliche, bisher nicht nachgewiesene Hypothesen zugrunde. Es wird angenommen, daß – unabhängig von der Bauart des Kopfhörers und von der Art des Referenzschallfeldes –

1. im gesamten Frequenzbereich der terzbandbebegrenzte Schall des Kopfhörers und der terzbandbegrenzte Schall des Lautsprechers gleiche Schalldruckpegel in den Ohrkanälen aufweisen, wenn sie gleiche Lautstärke hervorrufen (z.B. [23, 24]),
2. die gleiche Klangfarbe bei Kopfhörerwiedergabe wie bei entsprechender Lautsprecherwiedergabe empfunden wird, wenn im gesamten Frequenzbereich der terzbandbegrenzte Schall des Kopfhörers und der terzbandbegrenzte Schall des Lautsprechers gleiche Lautstärke hervorrufen (z.B. [5, 25]).

Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, daß die Klangfarbe und Lautstärke nicht vollständig determiniert sind durch das Schalldruckpegel-Spektrum am Trommelfell [3, 5, 26–30]. Es wird vermutet, daß die Bewertung der Schalle an den Trommelfellen in bezug auf Klangfarbe und Lautstärke durch das Gehör vom zugeordneten Lokalisationsprozeß abhängt: Unser Gehör entspricht einem Mikrofon mit nachgeschalteter zeitvarianter, adaptiver Filterung (vgl. [13, 31]). Gegebene Merkmale der Ohrsignale werden vorzugsweise entweder für die Bildung des Hörereignisortes oder für die Bildung der Hörereignisgestalt (Lautstärke, Klangfarbe) ausgewertet [14]. Daraus folgt, daß die Bildung der Lautstärke und die der Klangfarbe vom zugeordneten Lokalisationsprozeß abhängt [29]. Basierend auf dem Assoziationsmodell [13] wird vermutet, daß ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Klangfarbenbildung und Lokalisation besteht, derart, daß erst bei richtig erkanntem Schallquellenort (Ort des Hörereignisse = Ort des Schallereignisses) auch eine ungestörte Klangfarbenbildung erfolgt. Die ortsspezifischen Merkmale der Ohrsignale beeinflussen nicht die Klangfarbe, wenn sie im zugeordneten Lokalisationsprozeß von Bedeutung sind.

2.1. Der SLD-Effekt

Die adaptive Filterung im Assoziationsmodell wirkt als „Diskriminator" zur Unterscheidung von Ort und Beschaffenheit der Schallquelle. Daraus ergibt sich die Fähigkeit des Gehörs, die ortsspezifischen und quellenbezogenen Merkmale der Ohrsignale getrennt auszuwerten. Diese Fähigkeit ist von großer Bedeutung für die räumliche Wahrnehmung, doch sie kann sich störend bei Lautstärkevergleichsmessungen auswirken, wenn die zu vergleichenden Schalle unterschiedlich lokalisiert werden.

Der störende Effekt läßt sich anhand eines Beispiels aus der visuellen Wahrnehmung darstellen. Fig. 1 zeigt links zwei Figuren, die nebeneinander und gleich groß erscheinen. Im rechten Teil von Fig. 1 erscheinen die gleichen Figuren in unterschiedlichen Entfernungen, und ein Größenvergleich ist schwierig. Man ist kaum in der Lage, die Größen unabhängig von der wahrgenommenen Entfernung zu beurteilen. Dieses Beispiel illustriert, daß der Größenvergleich nur dann eine eindeutige und zutreffende Aussage über die Größenverhältnisse des Netzhautabbildes zuläßt, wenn die Wahrnehmung gleicher Entfernungen sichergestellt ist.

Es wird vermutet, daß dieser Effekt äquivalent zugrundegelegt werden muß bei der Lautstärkever-

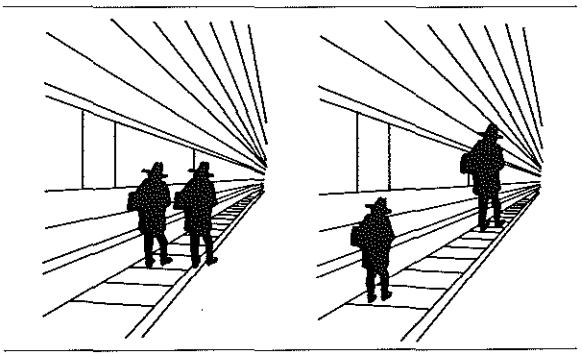

Fig. 1. Figuren von gleichbleibender Größe des Netzhautabbildes. Das subjektive Urteil über die Größe der Figuren ist „entfernungsabhängig".

gleichsmessung [6, 29]: Der Lautstärkevergleich läßt theoretisch nur dann eine eindeutige und zutreffende Aussage über Schalldruckverhältnisse an den Trommelfellen zu, wenn für den Fall lokalisierbarer Hörereignisse sichergestellt ist, daß ihre Entfernungen übereinstimmen.

Rudmose hat bereits in Zusammenhang mit Untersuchungen zum „missing 6-dB-effect" festgestellt, daß ein etwa 4 dB größerer Schalldruckpegel am Trommelfell gemessen wird, wenn anstelle des entfernten Lautsprechers der nahe Lautsprecher einen „gleich lauten" 100-Hz-Ton abstrahlt [27].

In [3] und [5] wurden Meßergebnisse an Kopfhörern verglichen, die sowohl mit der Lautstärkevergleichsmethode als auch mit der Sondenmeßmethode gewonnen wurden. Es zeigte sich, daß der „Schalldruckpegel-Lautstärke-Divergenz-Effekt" (SLD-Effekt) frequenzabhängig ist und Werte von maximal 7 dB annimmt. Der SLD-Effekt wurde näher untersucht bei Lautstärkevergleichsmessungen an Kopfhörern im Freifeld nach DIN 45619, Teil 1, in [28]. Es ergaben sich folgende Ergebnisse: Der SLD-Effekt beträgt im Bereich tiefer Frequenzen 0, 1, ... 2 kHz und hoher Frequenzen 6 ... 10 kHz durchschnittlich etwa 4 dB; er hängt ab von der Bandbreite des Testschalles, von der Bauart des Kopfhörers sowie von der Art des Schallfeldes. In [30] wurde die Frequenzabhängigkeit des SLD-Effektes im Diffusfeld untersucht. An zwei Kopfhörern wurde festgestellt, daß die Frequenzgänge der Übertragungsmaße nicht signifikant voneinander abweichen, wenn anstelle der Sondenmessung eine Lautstärkevergleichsmessung durchgeführt wird. Doch Gesetzmäßigkeiten lassen sich nicht ableiten. Dazu sind umfangreiche Messungen an vielen Kopfhörern erforderlich, die nicht nur binaural, sondern auch monaural erfolgen sollten.

Es ist bereits festzustellen, daß der SLD-Effekt bei Kopfhörermessungen nach DIN 45619, Teil 1, vorhanden ist, daß sich also die Meßergebnisse von entsprechenden Sondenmeßergebnissen unterscheiden. Die Unterschiede sind frequenzabhängig. Sie unterliegen starken Schwankungen, die von vielen Einflußgrößen abhängen. Nur mit extrem hohem experimentellen Aufwand konnte in [27] der SLD-Effekt unterdrückt werden. Derartige Anforderungen wären aber nicht praktikabel für einen Kopfhörer-Meßstandard.

Der Aufwand, der erforderlich ist, um erwünschte psychoakustische Effekte im Freifeld zu vermeiden, ist unangemessen hoch. Zudem ist noch nicht erwiesen, ob die störenden Einflußgrößen im Diffusfeld alle sicher vermieden werden können. Dazu müßten aber die Ursachen und Gesetzmäßigkeiten des SLD-Effekts bekannt sein.

2.2. *Konsequenz*

Mikrofonmessungen im Gehörgang stellen damit die geeignete Methode dar, das physikalisch definierte Übertragungsmaß von Kopfhörern an Versuchspersonen zu bestimmen, ohne die angesprochenen Meßunsicherheiten in Kauf nehmen zu müssen. Die dafür zur Verfügung stehende Meßtechnik ist seit langem aus den Forschungen zum Außenrohr bekannt (siehe z. B. [17], S. 25ff.). Neuerdings stehen Elektretmikrofone zur Verfügung, die so klein sind, daß sie in den Gehörgang von Versuchspersonen passen. Bezieht man den mit einem Mikrofon im Gehörgang einer Versuchsperson gemessenen Schalldruck auf einen an gleicher Stelle, aber unter anderen Bedingungen (z. B. Kopfhörer re Diffusfeld) gemessenen Schalldruck, so läßt sich nachweisen, daß die durch ein relativ zum Ohrkanaldurchmesser großes Mikrofon verursachten Störungen keine Rolle spielen: sie kürzen sich mit hinreichender Genauigkeit heraus (siehe dazu Abschn. 3.2; nähere Angaben zur Meßtechnik in [32, 33] und in [6]).

Die Messung des physikalisch definierten Übertragungsmaßes von Kopfhörern mit Hilfe eines Kunstkopfsystems erscheint aus mehreren Gründen vorteilhaft:

- Das Kunstkopfsystem läßt sich standardisieren. Ergebnisse aus verschiedenen Labors sollten daher eine optimale Übereinstimmung aufweisen.
- Das Kunstkopfsystem läßt sich kalibrieren, so daß die Referenzmessung im Referenzschallfeld entfällt. Die Messung kann dann in einer sehr kleinen störungsarmen Meßkammer erfolgen.
- Es gibt keine Meßfehler durch Geräusche der Versuchsperson (Schlucken, Husten, Nießen, Schluckauf).
- Die Messung erfolgt ohne Einführung der Meßsonde in den Ohrkanal, und es gibt daher keine Verletzungsgefahr und Hygiene-Probleme.
- Kunstkopfmessungen können sehr schnell durchgeführt werden.

Auf der anderen Seite lassen sich einige Nachteile aufzählen, die Kunstkopfmessungen (bisher) angelastet wurden:

- Die Meßergebnisse weichen zu sehr von denen der bisher verwendeten psychophysikalischen Methoden ab.
- Bei bisher entwickelten Kunstkopfsystemen wurden wichtige akustomechanische Eigenschaften des menschlichen Kopfes nicht genau genug nachgebildet.

Der erste Einwand wurde schon abgehandelt: es muß angenommen werden, daß die psychophysika-

lischen Methoden systematische und unsystematische Fehler verursachen, die für diese Abweichungen verantwortlich sind.

Zur Aufarbeitung des zweiten Einwandes sind bei der Entwicklung eines Kunstkopfsystems zur Messung von Störpegel- und Kapselgehörschützern Lösungen vorbereitet worden. In den letzten Jahren ist, durch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz gefördert, am Lehrstuhl für allgemeine Elektrotechnik und Akustik der Universität Bochum ein Kunstkopfsystem zur Messung von Stöpsel- und Kapselgehörschützern entwickelt worden [19–21]. In diesem Aufsatz soll über erste Messungen von Kopfhörern an diesem Kunstkopf berichtet werden. Diese Messungen wurden in den Räumlichkeiten und unter Zuhilfenahme von Meßgeräten des Instituts für Rundfunktechnik in München durchgeführt.

3. Kunstkopfmessungen von Kopfhörerübertragungsmaßen

Zunächst soll auf den verwendeten Kunstkopf eingegangen werden. Danach wird anhand theoretischer Überlegungen gezeigt, unter welchen Bedingungen die Einhaltung einer ungestörten Trommelfellimpedanz bei Kopfhörermessungen überflüssig ist. „Störungen" der Trommelfellimpedanz können bei Sondenmessungen an Versuchspersonen durch die Sonde bzw. durch das in den Ohrkanal eingeführte Mikrofon verursacht sein, bei Kunstkopfmessungen sind dies die Fehler des Ohrsimulators (Abweichung von der „richtigen" Trommelfellimpedanz). Standardisierte Ohrsimulatoren sind z. B. in [34, 35] beschrieben. Beide bilden die mittlere Trommelfellimpedanz, allerdings nur bis zu mittleren Frequenzen, nach. Daher erscheint hier die Frage, ob sie für Kunstkopfmessungen von Kopfhörern eingesetzt werden können, als besonders wichtig. Schließlich werden die durchgeführten Messungen und die dabei gewonnenen Ergebnisse beschrieben.

3.1. Beschreibung des Kunstkopfes

Fig. 2 zeigt den verwendeten Kunstkopf, dessen geometrische Abmessungen weitgehend den Maßen des KEMAR nach [15] entsprechen. Er enthält neben einer circumauralen auch eine intraaurale Nachbildung der mechanischen Eigenschaften von menschlicher Haut („künstliches Fleisch") nach [19]. Die Ohrmuschel wurde vom linken Ohr derjenigen Versuchsperson abgegossen, deren monaurale Außenohrübertragungsfunktionen sich als „typisch" herausgestellt hatten [20]. Auf der rechten Kopfseite ist nur die circumaurale Hautnachbildung, aber keine Ohrnachbildung vorhanden. Der

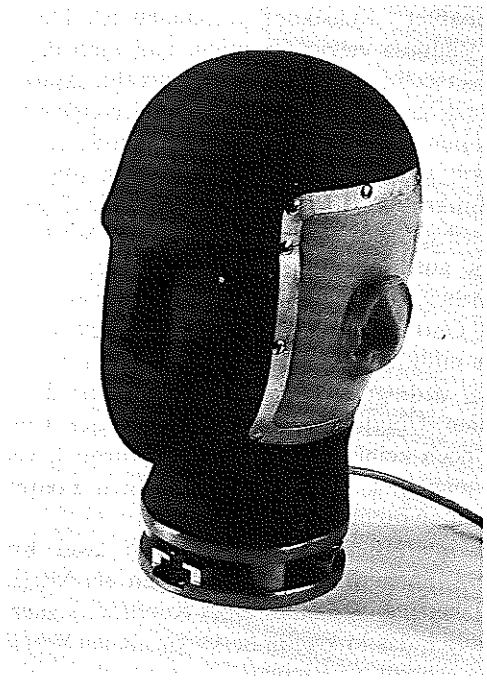

Fig. 2. Ansicht des eingesetzten Kunstkopfes mit Ohrmuschelnachbildung, künstlichem Fleisch und zusätzlicher Körperschallisolation.

Kunstkopf besitzt einen sog. Stichleitungskuppler, der die Trommelfellimpedanz für Messungen des Einfügungsdämmaßes von Stöpsel- und Kapselgehörschützern hinreichend genau nachbildet [20].

3.2. Einfluß des Ohrkanals einschließlich der Trommelfellimpedanz

Die hier dargestellte Ableitung ist eine Vereinfachung aus der in [36] für Gehörschützermessungen angegebenen Theorie. Übertragen auf den hier vorliegenden Fall beschreibt sie die Auswirkungen von Veränderungen der akustischen „Trommelfellimpedanz" auf die Freifeld- oder Diffusfeldübertragungsfunktion eines Kopfhörers (siehe auch [20]). Hier soll zunächst aber die Übertragungsfunktion eines Entzerrerfilters bestimmt werden, die nötig ist, um denjenigen Schalldruck am Ohr einer Versuchsperson bei Kopfhörerbeschallung zu erzeugen, den diese im Originalschallfeld gehabt hätte (originalgetreue Übertragung), was natürlich nicht heißt, daß dieser Schalldruck für jede Person gleich wäre. Außerdem ergeben sich aus der Theorie wichtige Forderungen für die Messung und die interindividuelle Mittelung des Freifeld- bzw. Diffusfeldübertragungsmaßes von Kopfhörern.

Vorausgesetzt sei, daß die Ohrmuschel- und Kopfgeometrie eines Aufnahmekunstkopfes der Ohrmuschel- und Kopfgeometrie der jeweiligen Versuchsperson entsprechen, also ein „individuell

angepaßter" Kunstkopf vorhanden ist. Dies kann z.B. dadurch erreicht werden, daß man den Kopf der Versuchsperson selbst als „Aufnahmekunstkopf" benutzt und daran auch die Kopfhörereigenschaften bestimmt (dies ist die „Sondenmethode"). Vorausgesetzt wird weiter, daß der Meßort (das Kunstkopfmikrofon oder das Mikrofon im Gehörgang der Versuchsperson) im Bereich ebener Wellen liegt (siehe auch [8]). Dies ist im Gehörgang im Hörfrequenzbereich der Fall, wenn man mehr als ca. 2 mm vom Ohrkanaleingang (der Concharückwand) entfernt mißt. Zu den Auswirkungen einer Verletzung dieser Bedingungen, z.B. durch Messung der interauralen Übertragungsfunktionen in der Choncha (wo noch keine ebenen Wellen vorliegen), vergleiche man [37]: sie können bei hohen Frequenzen mehr als 6 dB betragen.

Es interessieren hier vor allem zwei Fragen: erstens, unter welchen Bedingungen bei Messungen des Übertragungsmaßes eines Kopfhörers nach [33], die durch das Mikrofon hervorgerufenen Schallfeldstörungen zu vernachlässigen sind, und zweitens, inwieweit ein Kunstkopf für dererlei Messungen eingesetzt werden kann, der keine oder nur eine schlechte Nachbildung der Trommelfellimpedanz besitzt.

In Fig. 3 ist für eine Meßebene im Gehörgang, die die Bedingung „Vorliegen von nur ebenen Wellen" erfüllt, die Beschallungssituation im Schallfeld und bei Kopfhörerbeschallung dargestellt. In beiden Fällen soll dieselbe Meßebene E gewählt worden sein. Die in die Ebene E transformierte und durch das Mikrofon gestörte Trommelfellimpedanz sei $\tilde{Z}_T$, die ungestörte sei Z_T. Die aus dem Ohr heraus gesehene, sog. Abstrahlimpedanz sei Z_R, die wirksame akustische Innenimpedanz des Kopfhörers sei Z_K. Beide Impedanzen werden in der Ebene E gemessen.

P_0 ist die Fouriertransformierte des Leerlaufschalldrucks in der in Fig. 3 links gezeigten Referenzsituation. P_0 könnte in E bei einem dort angebrachten schallharten Abschluß ($\tilde{Z}_T = \infty$) gemessen

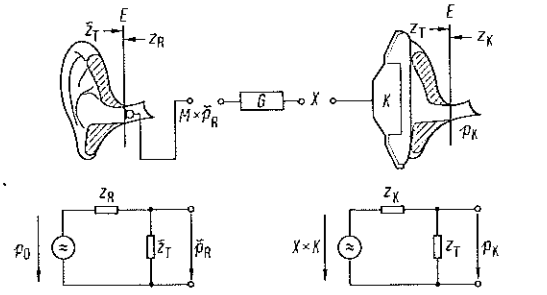

Fig. 3. Zur originalgetreuen Übertragung: Ersatzschaltung und Bezeichnung der relevanten akustischen Größen.

werden. In der Ebene E läßt sich die Fouriertransformierte des Schalldrucks $\tilde{p}_R$ messen, p_R wäre der Schalldruck bei Abwesenheit des Mikrofons. Das Mikrofon ergibt ein Ausgangssignal $M\tilde{p}_R$. Hierbei sei M der frequenzabhängige komplexwertige Übertragungsfaktor des Mikrofons. (Beim Kunstkopf wäre Z_T die ideale, $\tilde{Z}_T$ die realisierte Trommelfellimpedanznachbildung.)

Im Falle der Kopfhörerbeschallung ist die Fouriertransformierte des Leerlaufschalldrucks Kx (Fig. 3, rechts), wobei x das komplexe Spektrum des elektrischen Eingangssignals und K der komplexe Übertragungsfaktor des Kopfhörers bei akustischem Leerlauf in der Ebene E bedeutet. K könnte, ebenso wie p_0, durch eine Messung mit einem schallharten Abschluß in E bestimmt werden. In der Ebene E stellt sich bei ungestörter Trommelfellimpedanz der Schalldruck p_0 ein.

Im unteren Teil der Fig. 3 sind die beiden Fälle nochmals in Form elektrischer Ersatzbilder dargestellt. Es gilt:

$$\tilde{p}_R = \frac{\tilde{Z}_T}{Z_R + \tilde{Z}_T} p_0 \tag{1}$$

und

$$p_K = \frac{Z_T}{Z_K + Z_T} K x . \tag{2}$$

Verbindet man den elektrischen Ausgang des Mikrofons nun über ein noch zu bestimmendes Entzerrerfilter G mit dem elektrischen Eingang des Kopfhörers, so gilt:

$$x = G M \tilde{p}_R . \tag{3}$$

Die Fouriertransformierte des Schalldrucks in der Wiedergabesituation in Ebene E ist dann:

$$p_K = \frac{Z_T}{Z_K + Z_T} K G M \tilde{p}_R . \tag{4}$$

Für eine originalgetreue Übertragung muß der durch den Kopfhörer in E erzeugte Schalldruck gleich demjenigen Schalldruck sein, den die Versuchsperson im Originalschallfeld (ohne ein in den Ohrkanal eingesetztes Mikrofon) gehabt hätte. Dies heißt nicht, daß der am Aufnahmemikrofon herrschende Schalldruck im Wiedergabeohr reproduziert werden muß! Vielmehr muß gelten:

$$p_K \overset{!}{=} \frac{Z_T}{Z_R + Z_T} p_0 . \tag{5}$$

Gl. (5) liefert mit Gl. (4) und Gl. (1) eine Bestimmungsgleichung für das Filter G:

$$\frac{Z_T}{Z_R + Z_T} p_0 \overset{!}{=} \frac{Z_T}{Z_K + Z_T} K G M \frac{\tilde{Z}_T}{Z_R + \tilde{Z}_T} p_0 \tag{6}$$

$$G = \frac{1}{K M} \frac{Z_K + Z_T}{Z_R + Z_T} \frac{Z_R + \tilde{Z}_T}{\tilde{Z}_T} . \tag{7}$$

Daraus ergibt sich, wenn man Gl. (2) mit gestörten Trommelfellimpedanzen verwendet:

$$G = \frac{Z_K + Z_T}{Z_R + Z_T} \frac{Z_R + \tilde{Z}_T}{Z_K + \tilde{Z}_T} \frac{x}{M\tilde{p}_K}. \tag{8}$$

Hier ist $\tilde{p}_K$ die in der Ebene E meßbare Fouriertransformierte des Schalldrucks bei vorhandenem Mikrofon (gestörter Trommelfellimpedanz), und $M\tilde{p}_K$ die Fouriertransformierte der vom Mikrofon abgegebenen Spannung.

Die Übertragungsfunktion des Entzerrerfilters G erhält man demnach im wesentlichen durch eine (bezüglich der definierten Impedanz) zu korrigierende Messung der Übertragungseigenschaften des Kopfhörers in der durch das Mikrofon gestörten Schallfeldgeometrie. Wie Gl. (7) zeigt, kann die Korrektur entfallen, wenn entweder keine Schallfeldstörungen durch das Mikrofon hervorgerufen werden ($\tilde{Z}_T = Z_T$), oder aber die akustische Innenimpedanz des Kopfhörers gleich der Abstrahlimpedanz des Ohres ist ($Z_K = Z_R$). Ein Kopfhörer, der die letzte Bedingung erfüllt, soll hier als „ideal offener" Kopfhörer bezeichnet werden. Wie Messungen gezeigt haben, sind die durch den impedanzabhängigen Vorfaktor in Gl. (8) bedingten Korrekturen, selbst bei „völlig falscher" Trommelfellimpedanz und bei „geschlossenen" Kopfhörern, geringer als 3 dB (siehe z.B. [8], Fig. 8 und [20], Bild 5.3/2, S. 89). Wichtig ist aber, daß die Position des Mikrofons (die Lage der Meßebene und die gestörte Trommelfellimpedanz $\tilde{Z}_T$) bei Aufnahme und Wiedergabe exakt gleich ist.

Der verwendete Kunstkopf nach Abschn. 3.1 besitzt auf jeden Fall eine für unsere Zwecke hinreichend genaue Trommelfellimpedanznachbildung, so daß Abweichungen der Meßergebnisse am Kunstkopf und an Versuchspersonen nicht auf unterschiedliche Gehörgänge zurückzuführen sind. Auch bezüglich der interindividuellen Unterschiede in den Meßergebnissen ist hier festzustellen, daß diese nicht durch unterschiedlichen Geometrien der Gehörgänge bzw. unterschiedliche Trommelfellimpedanzen erklärt werden können. Wäre das der Fall, so wäre das „Richtungshören" sicherlich so individuell, daß kein Kunstkopfsystem in der Lage wäre, selbst einen kleinen Kreis der Hörer von kunstkopfstereofonen Übertragungen zufriedenzustellen. Glücklicherweise sind aber „nur" die unterschiedlichen Ohrmuschel- und Kopfgeometrien für mögliche Übertragungsfehler verantwortlich zu machen.

Das hier bestimmte Entzerrerfilter G enthält die Übertragungsfunktion des Kopfhörers nicht per se, sondern entzerrt den Kopfhörer und den Kunstkopf für beliebige Schallfelder und Meßebenen. Erst die Aufspaltung von G in einen Aufnahme- und einen Wiedergabeteil G_A und G_W bringt die Festlegung einer eindeutigen Schnittstelle mit sich. Gleichwohl gilt für alle möglichen Schnittstellen, daß das Gesamtfilter und damit auch die Kopfhörerübertragungsfunktion mit einem relativ „großen" Mikrofon im Ohrkanal von Versuchspersonen bestimmt werden kann, solange das gleiche Mikrofon in der gleichen Position im Ohrkanal auch bei der Referenzmessung im Schallfeld eingesetzt wird.

Nach den Ausführungen dieses Abschnitts ist es wichtig, Kopfhörermessungen jeweils individuell für jede Versuchsperson auf das Referenzschallfeld zu beziehen. Eine Mittelung über so erhaltene Übertragungsmaße eines Kopfhörers entspricht also einer Mittelung über die verschiedenen Ohrmuschel- und Kopfgeometrien. Hier ergibt sich z.B. auch eine einfache Möglichkeit, um ein „typisches" Ohr (Median) aus einem Katalog von Versuchspersonen herauszusuchen: da bei der Messung des Diffusfeldübertragungsmaßes von Kopfhörern im Referenzfall alle Schalleinfallsrichtungen beteiligt sind, entfällt so die mühsamere Bewertung verschiedener Einfallsrichtungen, wie sie z.B. bei Auswertung der monauralen Übertragungsmaße nötig ist.

Bezieht man, wie in [33] zugelassen, nicht individuell auf ein Referenzschallfeld (z.B. in Form des Diffusfeldübertragungsmaß eines jeden Versuchspersonenohres), sondern auf das mittlere Übertragungsmaß eines Bezugskopfhörers, so werden die der Ohrmuschel und dem Kopf zuzurechnenden Anteile der Außenohrübertragungsfunktionen nicht individuell erfaßt, sondern nur „im Mittel". Gleichwohl kürzen sich zwar die gehörgangsbedingten Anteile i.a. auch hier heraus, wie oben abgeleitet, aber durch den Ersatz des individuellen Referenzübertragungsmaßes der Ohren der einzelnen Versuchspersonen durch den Mittelwert für den Bezugskopfhörer wird der Mittelwert des Übertragungsmaßes des aktuell getesteten Kopfhörers i.a. ein anderer sein als derjenige, der sich unter Verwendung eines Schallfeldes (z.B. Diffusfeld) als Referenz ergibt, es sei denn, es wurden auch bei der Messung des Bezugskopfhörers dieselben Versuchspersonen eingesetzt. Benutzt man unterschiedliche Versuchspersonenstichproben für beide Kopfhörer, so liefern beide Methoden erst im Grenzfall vieler Versuchspersonen das gleiche Ergebnis (denn beide Stichproben haben gleiche Erwartungswerte).

3.3. Kunstkopfmessungen des Diffusfeldübertragungsmaßes von Kopfhörern

Im folgenden soll auf die durchgeführten Messungen eingegangen werden. Diese erfolgten im „großen" Hallraum des Instituts für Rundfunktechnik in München (Volumen des verwendeten Hallraums: $V = 180\ \mathrm{m}^3$).

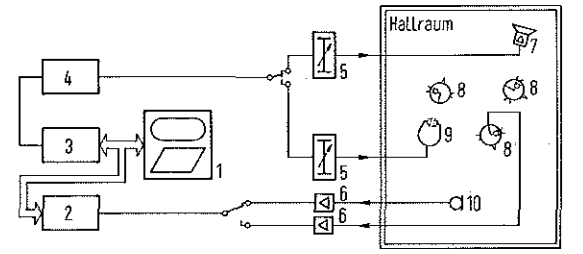

Fig. 4. Meßanordnung:
1 Kleincomputer, Hewlett-Packard HP 9845 B; *2* Spectrum Analyser, Hewlett-Packard HP 3582 A; *3* Relay Actuator, Hewlett-Packard HP 59306 A; *4* Rauschgenerator/Rosa Rauschen, Wandel & Goltermann RG 1; *5* Pegelsteller, Neumann W 444; *6* Vorverstärker, Neumann PMV 70; *7* Lautsprecher, Klein & Hummel 092; *8* Kunstkopf mit Bruel & Kjaer 4134 an drei Positionen; *9* Kopfhörer; *10* Meßmikrofon, Bruel & Kjaer 4145.

3.3.1. Verwendete Meßgeräte

Der Meßaufbau für die durchgeführten Messungen ist in Fig. 4 dargestellt. Die Messungen wurden vom zugehörigen Kontrollraum unter Verwendung eines Kleincomputers Hewlett-Packard HP 9845 B und eines Spectrum-Analysers HP 3582 A weitgehend automatisch durchgeführt (Meßprogramm nach [38]). Das Ausgangssignal des Bruel & Kjaer 4134 Kunstkopfmikrofons wurde dem Spektrum-Analyser HP 3582 A zugeführt, der die Terzanalyse vornahm (siehe [39]).

3.3.2. Verwendete Meßmethode

Die Messung des Kunstkopfes im diffusen Schallfeld erfolgte an drei unterschiedlichen Positionen, über die gemittelt wurde. Der Kunstkopf „blickte" dabei jeweils in eine andere Richtung.

Der Schallpegel betrug bei der Diffusfeldmessung ca. 80 dB(A). Bei der Beschallung des Kunstkopfes mit Kopfhörer wurde der elektrische Pegel für die Kopfhörer subjektiv auf eine „hohe" aber „noch erträgliche" Abhörlautstärke eingestellt. Wegen der später erfolgten Normierung der Diffusfeldübertragungsmaße spielte der absolute Schallpegel bei der Kopfhörerbeschallung des Kunstkopfes keine Rolle. Jeder Kopfhörer wurde dreimal am Kunstkopf gemessen. Aus den drei Messungen wurden jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung für die betrachteten Terzen berechnet. Die Standardabweichungen blieben i.a. unter 1 dB bis auf einen Fall, bei dem Abdichtungsprobleme auftraten. Hier ergaben sich Standardabweichungen von ca. 3 dB.

Für die im folgenden beschriebene Bestimmung des Diffusfeldübertragungsmaßes von Kopfhörern mit Verwendung des Kunstkopfes werden jeweils die Mittelwerte aus drei Messungen für das betrachtete Terzband herangezogen. Mit Hilfe des Meßmikrofons Bruel & Kjaer 4145 (diffusfeldkorrigiert) wurden zunächst die im diffusen Schallfeld an den drei Kunstkopfpositionen herrschenden Terzschallpegel gemessen und daraus der Mittelwert $L_{4145,\mathrm{DF}}$ bestimmt. Das Diffusfeldübertragungsmaß des Kunstkopfes für eine Terz ist dann:

$$L_{\mathrm{KD}} = L_{\mathrm{D}} - L_{4145,\mathrm{DF}}\,. \tag{9}$$

Dabei ist L_{D} der mit dem im Kopf befindlichen Bruel & Kjaer 4134 gemessene Terzpegel im Diffusschallfeld. Für das Diffusfeldübertragungsmaß eines Kopfhörers in einer bestimmten Terz ergibt sich damit:

$$L_{\mathrm{DF,KH}} = L_{\mathrm{KH}} - L_{\mathrm{KD}}\,. \tag{10}$$

Hierbei ist L_{KH} der am Kunstkopf ermittelte Terzpegel bei Beschallung durch den zu messenden Kopfhörer.

Wird der Kunstkopf derart kalibriert, daß er ein ebenes Diffusfeldübertragungsmaß aufweist (L_{KD} = Konst.), so läßt sich das Diffusfeldübertragungsmaß des zu messenden Kopfhörers durch die Messung am Kunstkopf direkt bestimmen. Eine andere Möglichkeit, den Kunstkopf zu kalibrieren und entsprechend das Diffusfeldübertragungsmaß des zu messenden Kopfhörers am Kunstkopf direkt zu messen, ergibt sich bei bekannten (am Kunstkopf ermittelten) Diffusfeldübertragungsmaß eines Bezugskopfhörers. Entsprechend Gl. (10) ist das Diffusfeldübertragungsmaß des Bezugskopfhörers:

$$L_{\mathrm{DF,Bez.KH}} = L_{\mathrm{Bez.KH}} - L_{\mathrm{KD}}\,. \tag{11}$$

Nach Umstellen der Gl. (11) und Einsetzen von L_{KD} in Gl. (10) erhält man für das Diffusfeldübertragungsmaß des zu messenden Kopfhörers in der betrachteten Terz:

$$L_{\mathrm{DF,KH}} = L_{\mathrm{KH}} - [L_{\mathrm{Bez.KH}} - L_{\mathrm{DF,Bez.KH}}]\,. \tag{12}$$

Die direkte Bestimmung des Diffusfeldübertragungsmaßes des zu messenden Kopfhörers ist möglich, wenn der Kunstkopf derart kalibriert wird, daß mit dem Bezugskopfhörer das Diffusfeldübertragungsmaß desselben Hörers am Kunstkopf gemessen wird

$$(L_{\mathrm{Bez.KH}} - L_{\mathrm{DF,Bez.KH}} = \mathrm{Konst})\,.$$

Trotz mittlerer Abmessungen stellt es ein Problem dar, einem Kunstkopf Kopfhörer „richtig" aufzusetzen. Um die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse zwischen verschiedenen Kopfhörern zu gewährleisten, wurde diese Aufgabe in fast allen Fällen durch die gleiche Person durchgeführt. Dabei wurde der zu messende Kopfhörer zunächst gespreizt von hinten über den Kunstkopf geführt und dann möglichst zentrisch auf die Ohrpositionen abgesetzt. Zuletzt erfolgten noch kleine Korrekturen, um von außen

sichtbare Undichtigkeiten im Sitz auszuschließen. Eine akustische Kontrolle des Sitzes wurde allerdings nicht durchgeführt. Sie könnte z. B. dadurch erfolgen, daß der Kopfhörer beim „Aufsetzen" ein Breitbandrauschen abstrahlt und der Versuchsleiter das durch den Kunstkopf aufgenommene Signal über einen zweiten Kopfhörer zugespielt bekommt. Achtet der Versuchsleiter dabei auf die Tiefen im Klangbild, so läßt sich auf diese Weise der optimale Sitz eines Kopfhörers recht leicht finden.

Bei dem circumauralen Kopfhörer AKG K 340 war kein befriedigend dichter Sitz zu erreichen, da das linke Kunstkopfohr relativ weit aus dem Kopf „herausragte". In den Ergebnissen wird dies durch ein zu geringes Übertragungsmaß bei tiefen Frequenzen deutlich. Der entsprechende Kopfhörer hatte ein vergleichsweise geringes Kapselvolumen. Dies macht deutlich, daß eine künstliche Ohrmuschel auch eine mittlere mechanische Nachgiebigkeit besitzen sollte, so daß sie bei einem evtl. aufliegenden Kopfhörer genauso weit nachgibt, wie ein natürliches Ohr. Entsprechende Entwicklungsarbeiten sind notwendig, stellen aber kein gravierendes Problem dar. Im übrigen ergaben sich bei den gemessenen supraauralen Kopfhörern keine Schwierigkeiten dieser Art.

Das Diffusfeldübertragungsmaß eines Kopfhörers (STAX Lambda Professional) wurde zweimal anhand von unabhängigen Messungen bestimmt. Die aufgetretenen Abweichungen zwischen beiden Messungen lagen unter 1 dB. Die Reproduzierbarkeit des Meßverfahrens ist damit als sehr gut zu bezeichnen.

3.3.3. Gemessene Kopfhörer

Insgesamt 7 Kopfhörer wurden am Kunstkopf gemessen. Davon waren 5 circumauraler und 1 supraauraler Art. Ein Kopfhörer wies eine Sonderform auf (offen, nicht supraaural). Die gemessenen Kopfhörer sind in Tab. I aufgelistet. Für alle Kopfhörertypen lagen die Diffusfeldübertragungsmaße nach der Sondenmeßmethode (siehe z. B. [32]) an 5 Versuchspersonen vor. Es wurden dieselben Kopfhörerexemplare für die Messung am Kunstkopf und an Versuchspersonen verwendet.

Tabelle I.
Liste der gemessenen Kopfhörer.

AKG K240 Studio Monitor (circumaural)
AKG K340 (circumaural)
BEYER DT 880 (circumaural)
BEYER DT 880 Monitor (circumaural)
JECKLIN FLOAT I (offen, nicht supraaural)
SENNHEISER HD 414 SL (supraaural)
STAX SR Lambda pro (circumaural)

3.3.4. Ergebnisse

Ein Vergleich der Diffusfeldübertragungsmaße, gemessen am Kunstkopf und an 5 Versuchspersonen, ist anhand der Fig. 5 bis 11 möglich.

Mit (a) sind jeweils für den betreffenden Kopfhörer das am Kunstkopf gemessene Diffusfeldübertragungsmaß und die an 5 Versuchspersonen gemessenen individuellen Diffusfeldübertragungsmaße bezeichnet. Mit Ausnahme des Kopfhörers AKG K340 (Fig. 6) können die Ergebnisse in der Weise

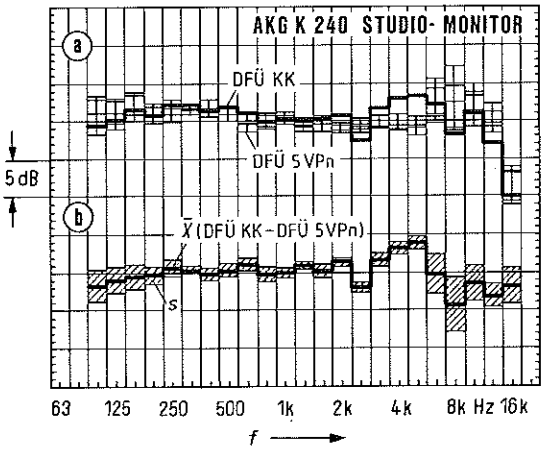

Fig. 5. Ergebnisse für den Kopfhörer K240 Studio-Monitor.
a) Diffusfeldübertragungsmaße, gemessen am Kunstkopf (DFÜ KK) und an 5 Versuchspersonen (DFÜ 5 VPn),
b) Abweichung des Diffusfeldübertragungsmaßes nach der Kunstkopfmeßmethode von den Diffusfeldübertragungsmaßen nach der Sondenmeßmethode an 5 Versuchspersonen (Mittelwert x und Standardabweichung s).

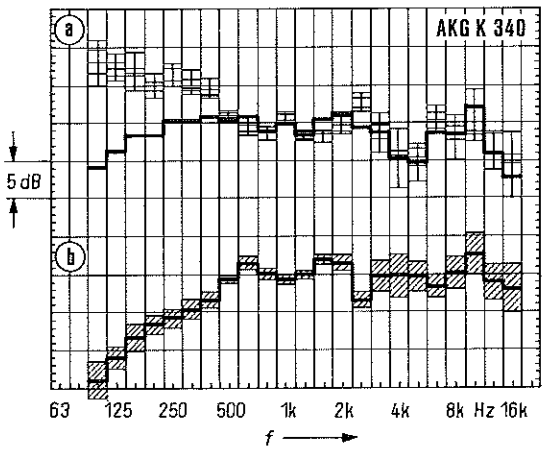

Fig. 6. Ergebnisse für den Kopfhörer AKG K340; a), b) vgl. Fig. 5.

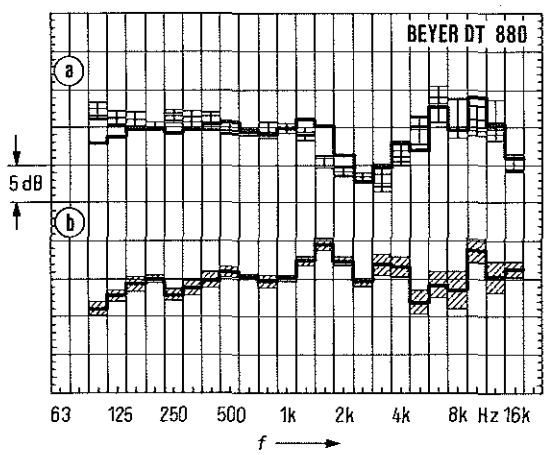

Fig. 7. Ergebnisse für den Kopfhörer BEYER DT 880; a), b) vgl. Fig. 5.

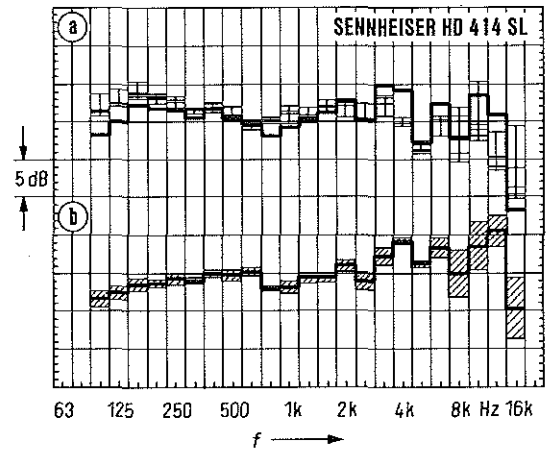

Fig. 10. Ergebnisse für den Kopfhörer SENNHEISER HD 414 SL; a), b) vgl. Fig. 5.

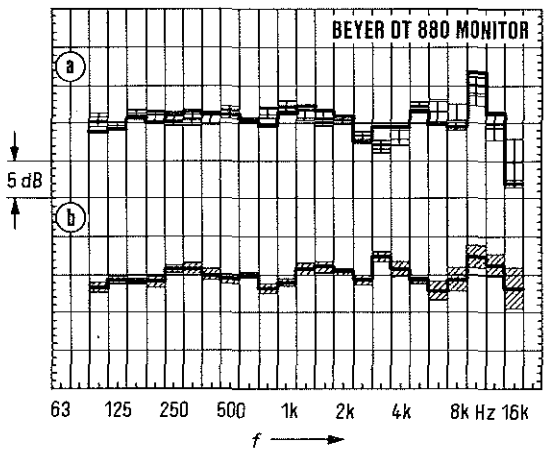

Fig. 8. Ergebnisse für den Kopfhörer BEYER DT 880 Monitor; a), b) vgl. Fig. 5.

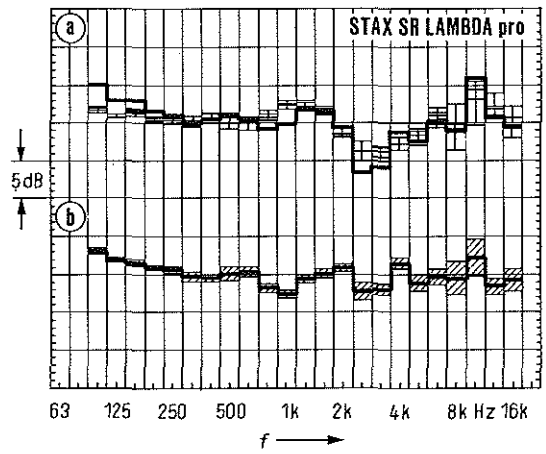

Fig. 11. ; Ergebnisse für den Kopfhörer STAX SR Lambda pro; a), b) vgl. Fig. 5.

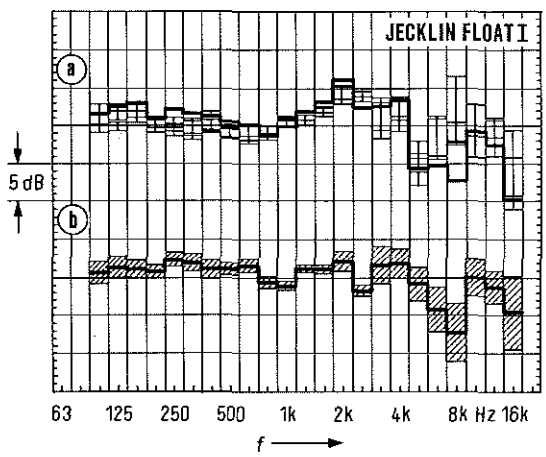

Fig. 9. Ergebnisse für den Kopfhörer JECKLIN FLOAT I; a), b) vgl. Fig. 5.

interpretiert werden, daß der Kunstkopf eine Versuchsperson repräsentiert.

Die Abweichungen zwischen dem am Kunstkopf gemessenen Diffusfeldübertragungsmaß und den an 5 Versuchspersonen gemessenen Diffusfeldübertragungsmaßen beim K340 im Bereich zwischen 100 Hz und 500 Hz ist auf die zu geringe mechanische Nachgiebigkeit der Ohrmuschel zurückzuführen. Die Kopfhörerkapsel lag dadurch auf der Ohrmuschel auf und rief einen undichten Abschluß hervor. Im Bereich 500 Hz ··· 16 kHz repräsentiert das Meßergebnis am Kunstkopf aber auch bei diesem Kopfhörer eine Versuchsperson.

Mit (b) sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Abweichungen des Diffusfeldübertragungsmaßes nach der Kunstkopfmethode von den

Diffusfeldübertragungsmaßen nach der Sondenmeßmethode an 5 Versuchspersonen bezeichnet. Die Kurven (b) zeigen, daß die Größe und Frequenzlage der Abweichungen vom Kopfhörertyp abhängig sind.

Beim Vergleich der Ergebnisse nach der Kunstkopfmethode mit dem Mittelwert über die 5 individuellen Diffusfeldübertragungsmaße nach der Sondenmeßmethode (jeweils Kurven b) zeigt sich, daß das Ergebnis am Kunstkopf den Mittelwert abhängig vom Kopfhörertyp mit einer Genauigkeit von ± 2,5 dB bis ± 5,5 dB repräsentiert.

Da bei den bisher im IRT durchgeführten Sondenmessungen an Versuchspersonen keine „typische" Versuchsperson ermittelt werden konnte, die unabhängig vom Kopfhörertyp den Mittelwert über mindestens 5 Versuchspersonen ausreichend gut repräsentiert[1], wird angenommen, daß ein „typischer" Kunstkopf nicht realisierbar ist.

Um dennoch die Diffusfeldübertragungsmaße von Kopfhörern mit der Kunstkopfmethode ebenso genau bestimmen zu könne wie mit der Sondenmeßmethode an Versuchspersonen, wird vorgeschlagen, statt an einem einzigen Kunstkopf an einer ausreichend großen Kunstkopf-Population mit unterschiedlichen Ohr- und Kopfgeometrien zu messen.

4. Schlußfolgerungen

Der alte Wunsch nach einem universellen Kopfhörer-Meßkuppler scheint heute aus zwei Gründen keine Utopie mehr zu sein:

1. Die früher gefundenen Divergenzen zwischen den Ergebnissen von Lautstärkevergleichsmessungen und Kupplermessungen sind bisher allein auf die akusto-mechanischen Eigenschaften des Kupplers zurückgeführt worden. Durch Verbesserungen der Ohrsimulatoren hat man versucht, eine von der Bauart des Kopfhörers unabhängige Übereinstimmung der Meßergebnisse zu erzielen. Die neueren Ergebnisse zum SLD-Effekt zeigen, daß das nicht grundsätzlich möglich ist. Ein Kuppler kann bestenfalls die physikalischen Verhältnisse einer Kopfhörerankopplung vollständig nachbilden, nicht aber die psychoakustischen Verhältnisse des Lautstärkevergleichs. Der SLD-Effekt hat zur Konsequenz, daß nur die Ergebnisse der Sondenmessung, nicht aber die Ergebnisse der Lautstärkevergleichsmessung mit einer Kupplerbzw. Kunstkopfmessung reproduzierbar sind. Da nach [3, 6] das physikalisch definierte Diffusfeldübertragungsmaß zugrundegelegt werden muß, um die in bezug auf „Klangfarbe" relevante Ankopplung eines Kopfhörers an den Ohrkanal bestimmen zu können, ist die Anwendung eines Kunstkopfmeßverfahrens berechtigt und sinnvoll.
2. Es ist gezeigt worden, daß die hinreichend genaue Nachbildung der individuellen akusto-mechanischen Eigenschaften möglich ist ohne Verwendung eines genauen Ohrsimulators. Da angenommen werden muß, daß ebenso wenig eine „mittlere" Ohrmuschel wie ein „mittlerer" Fingerabdruck existiert, wird vorgeschlagen, nicht an einem „mittleren" Kunstkopf zu messen, sondern an einer genügend großen Kunstkopf-Population, um die Ergebnisse von Sondenmessungen reproduzieren zu können. Diese Population könnte in einer Minimalversion durch mehrfachen Austausch der künstlichen Ohrmuschel gegen Ohrabgüsse von unterschiedlichen Versuchspersonen erreicht werden. Es existieren bereits Methoden, solche Ohrabgüsse vorgabegemäß herzustellen [40], so daß Ohrmuscheln genormt werden könnten.

Die Messung von Kopfhörern mit Hilfe von diffusfeld-kalibrierten Kunstköpfen steht prinzipiell im Einklang mit der Definition der Diffusfeldentzerrung für Kopfhörer. In technischer Hinsicht muß kein Ohrsimulator und – bei Anwendung einer Kunstkopf-Population – keine Nachbildung der „mittleren" akusto-mechanischen Kopf-Eigenschaften realisiert werden. Unter diesen neuen Voraussetzungen erscheint die Entwicklung eines Kunstkopf-Meßverfahrens erfolgversprechend.

(Eingegangen am 24. Juli 1985.)

[1] Die Messung einiger Kopfhörer an einer größeren Anzahl von Versuchspersonen (maximal 15) hat gezeigt, daß das mittlere Diffusfeldübertragungsmaß durch den Mittelwert über 5 Versuchspersonen ausreichend gut repräsentiert wird [32].

Literatur

[1] DIN 45619, Teil 1: Kopfhörer; Bestimmung des Freifeld-Übertragungsmaßes durch Lautstärkevergleich mit einer fortschreitenden Schallwelle. Beuth-Verlag, Berlin und Köln 1975.
[2] DIN 45619, Teil 2: Kopfhörer; Bestimmung des Freifeld-Übertragungsmaßes durch Lautstärkevergleich mit einem Bezugskopfhörer. Beuth-Verlag, Berlin und Köln 1975.
[3] Theile, G., Untersuchung zur Standardisierung eines Studiokopfhörers. Rundfunktechn. Mitt. 27 [1983], 17 und (engl.) in: EBU Review-Technical No. 197 [1983], 3.
[4] DIN 45500, Teil 10: Heimstudio-Technik (HiFi), Mindestanforderungen an dynamische Kopfhörer nach dem Tauchspulenprinzip. Beuth-Verlag, Berlin und Köln. Entwurf 1986.

[5] Sahr, R. D., Measuring methods for headphones. AES-Convention, New York Oktober 1983.
[6] Theile, G., On the standardization of the frequency response of high quality studio headphones. Beitrag zur AES '85, Hamburg 1985, Preprint 2207.
[7] Tool, F. E., The acoustics and psychoacoustics of headphones. Beitrag zur 2nd Conference Audio of AES, California 1984, Preprint C 1006.
[8] Hudde, H. und Schröter, J., The equalization of artificial heads without exact replication of the eardrum impedance. Acustica **44** [1980], 301.
[9] Theile, G., Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Klangfarbe. Rundfunktechn. Mitt. **25** [1981], 146.
[10] Wollherr, H., Mikrofonankopplung an das Außenohr eines neuen Kunstkopfes. Rundfunktechn. Mitt. **25** [1981], 141.
[11] Plenge, G., Probleme bei der Einführung der Kunstkopfstereofonie beim Hörrundfunk. Rundfunktechn. Mitt. **22** [1978], 216.
[12] Steinke, G., Möglichkeiten und Grenzen der kopfbezogenen Stereofonie. Radio Fernsehen Elektronik **28** [1979], 388 und 456.
[13] Theile, G., Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld. Dissertation, Technische Universität Berlin 1980.
[14] Theile, G., Zur Theorie der optimalen Wiedergabe von stereofonen Signalen über Lautsprecher und Kopfhörer. Rundfunktechn. Mitt. **25** [1981], 155.
[15] Burkhard, M. D. und Sachs, R. M., Anthropometric manikin for acoustical research. J. Acoust. Soc. Amer. **58** [1975], 214.
[16] Peus, S., Natürliches Hören mit künstlichem Kopf. Funkschau **6** [1983], 41.
[17] Blauert, J., Spatial hearing – The psychophysics of human sound localization. MIT-Press, Cambridge (Mass.) 1983.
[18] Villchur, E., Free-field calibration of earphones. J. Acoust. Soc. Amer. **46** [1969], 1527.
[19] Schröter, J. und Els, H., Die akustischen Eigenschaften des menschlichen Kopfes. Forschungsbericht 239 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz in Dortmund, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1980.
[20] Schröter, J., Messung der Schalldämmung von Gehörschützern mit einem physikalischen Verfahren (Kunstkopfmethode). Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1983; erschienen als Forschungsbericht 344 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz in Dortmund.
[21] Schröter, J. und Pösselt, C., Methods for objectively measuring the insertion loss of HPDs, including simulation of bone conduction pathways. J. Acoust. Soc. Amer. **76** [1984], Suppl. 1, S42.
[22] IEC-Publ. 268-3. part 7: Sound system equipment: headphones and headsets, 1981.
[23] Jahn, G., Über die Beziehung zwischen Lautstärke und dem Schalldruck am Trommelfell. Hochfrequenz und Elektroakustik **67** [1959], 69.
[24] Robinson, W. D., Whittle, L. S. und Bowsher, J. M., The loudness of diffuse sound fields. Acustica **11** [1961], 397.
[25] Griese, H. J., Was ist das „Freifeld-Übertragungsmaß" eines Kopfhörers? Funkschau **50** [1978], 811.
[26] Mathers, C. D. und Landsdowne, K. F., Hearing risk to wearers of circumaural headphones: an investigation. BBC-Report RD 1979/3.
[27] Rudmose, W., The case of the missing 6 dB. J. Acoust. Soc. Amer. **71** [1982], 650.
[28] Fastl, H., Schmid, W., Theile, G. und Zwicker, E., Schallpegel im Gehörgang für gleichlaute Schalle aus Kopfhörern bzw. Lautsprechern. Beitrag zur DAGA 1985, Stuttgart 1985.
[29] Theile, G., Sind „Klangfarbe" und „Lautstärke" vollständig determiniert durch das Schalldruckpegel-Spektrum am Trommelfell? In: Fortschritte der Akustik, DAGA '84, VDE-Verlag, Berlin 1984.
[30] Spikofski, G., Stoll, G. und Theile, G., Bestimmung von Kopfhörer-Übertragungsmaßen im diffusen Schallfeld: Sonden- oder Lautstärkevergleichsmessung? Beitrag zur DAGA '85, Stuttgart 1985.
[31] Platte, H.-J., Zur Bedeutung der Außenohrübertragungseigenschaften für den Nachrichtenempfänger „menschliches Gehör". Dissertation, Technische Hochschule Aachen 1979.
[32] Spikofski, G. und Theile, G., Die Messung linearer Verzerrungen bei Kopfhörerwiedergabe. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '84, DPG-Verlag, Bad Honnef, pp. 201–205.
[33] DIN 45619, Teil 3: Kopfhörer; Bestimmung des Diffusfeld-Übertragungsmaßes durch Sonden-Vergleichsmessungen. Unveröffentlichte Normvorlage des Instituts für Rundfunktechnik, Februar 1983.
[34] IEC 711: Occluded-ear simulator for the measurement of ear-phones coupled to the ear by ear inserts. IEC TC29C/WG6 (Draft), 1981.
[35] ANSI S3.25: American National Standard for an Occluded Ear Simulator. Standards Secretariat, Acoustical Society of America, 335 East 45th Street, New York, NY 10017, 1979.
[36] Schröter, J. und Els, H., On basic research towards an improved artificial head for measurement of hearing protectors. Acustica **50** [1982], 250 und Acustica **51** [1982], 302.
[37] Schröter, J., Brusis, T. und Luckhaupt, H., Vergleich von Messungen des interauralen Übertragungsmaßes in Hinblick auf das Problem seitendifferenter Lärmbelastungen am Arbeitsplatz. Arbeitsmed. Sozialmed. Präventivmed. **20** [1985], 32.
[38] Thomas, M., Programmierung eines HP 9845 B Kleinrechners zur Durchführung von Messungen mit Terzrauschen unter Verwendung eines HP 3582 A Spectrum Analysers. Interner unveröffentlichter Bericht IRT, 1984.
[39] Hewlett-Packard, Third octave analysis with the HP 3582 A spectrum analyser. Application Note AN 245-3.
[40] Els, H., Persönliche Kommunikation am Lehrstuhl für Allg. Elektrotechnik und Akustik. Ruhr-Universität Bochum.