

Kunstkopftechnik - Eine Bestandsaufnahme

Eine Mitteilung aus dem Normenausschusses "Psychoakustische Messtechnik"
(NA 001-01-02-08 AK, vormals NALS A 2 AK 8)

Peter Daniel, Brüel & Kjaer GmbH, Bremen, peter.daniel@bksv.com

Hugo Fastl, AG Technische Akustik, TU München, fastl@mmk.ei.tum.de

Thomas Fedtke, Fachbereich Schall, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig,
thomas.fedtke@ptb.de

Klaus Genuit, HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath, klaus.genuit@head-acoustics.de

Hans-Peter Grabsch, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, hans-peter.grabsch@de.bosch.com

Torsten Niederdränk, Siemens Audiologische Technik GmbH, Erlangen,
torsten.niederdraenk@siemens.com

Alfred Schmitz, TAC - Technische Akustik, Korschenbroich, schmitz@tac-akustik.de

Michael Vorländer, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, mvo@akustik.rwth-aachen.de

Manfred Zollner, Fachhochschule Regensburg, manfred.zollner@e-technik.fh-regensburg.de

Herausgeber: Thomas Fedtke, thomas.fedtke@ptb.de

Inhalt

0. Einleitung

1. Grundlagen der Kunstkopftechnik

- 1.1 Räumliches Hören
- 1.2 Außenohr-Übertragungsfunktion
- 1.3. Prinzip der binauralen Aufnahme und Wiedergabe
- 1.4 Individualproblem
- 1.5 Einteilung von Kunstkopftypen
- 1.6 Der Kunstkopf als Aufnahmemikrofon
- 1.7 Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen
 - 1.7.1. Messung der Kopfhörerentzerrung
 - 1.7.2 Wiedergabe mit Lautsprechern

2. Anwendungen der kopfbezogenen Messtechnik

- 2.1. Fahrzeugtechnik
 - 2.1.1 Messung der Vorbeifahrgeräusche eines Kraftfahrzeuges
 - 2.1.2 Kraftfahrzeug-Innengeräusch
 - 2.1.3 Geräuschdesign
- 2.2. Gerätetechnik
- 2.3. Raumakustik
- 2.4. Messung der Schallimmission durch ohrnahe Schallquellen
- 2.5. Messungen an Hörgeräten
- 2.6. Messungen an Gehörschützern
- 2.7. Lärm-Messtechnik
- 2.8. SoundScapes

3. Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit

- 3.1. Unsicherheit der mit Kunstköpfen ermittelten Messdaten
 - 3.1.1 Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Übertragungsfunktion im Freifeld (Horizontalebene)
 - 3.1.2 Bestimmung der Freifeld-Diffusfeld-Transformation von Kunstköpfen
- 3.2. Hörbarkeit von Unterschieden zwischen den Kunstkopfsystemen
- 3.3 Methodisch bedingte Fehler bei binauralen Hörversuchen

4. Fazit und Ausblick

0. Einleitung (H. Fastl, T. Fedtke)

Im Rahmen des Normenausschusses NA 001-01-02-08 AK (vormals NALS A 2 AK 8) "Psychoakustische Messtechnik" besteht eine Arbeitsgruppe "Kunstkopftechnik", welche sich das Ziel gesetzt hat, die Normung auf dem Gebiet der Kunstköpfe voranzutreiben. Der Stand der Normen repräsentiert zur Zeit nur einen Teil der auf dem Markt erhältlichen Kunstkopf-Systeme und ist nicht ausreichend, die Vergleichbarkeit von Messungen mit verschiedenen Systemen zu gewährleisten. Versuche, anstelle der geometrischen Abmessungen die Richtcharakteristika zu normen, führten nicht zum gewünschten Ergebnis. Aus diesem Grund hat sich der Arbeitskreis entschlossen, eine Bestandsaufnahme vorzunehmen, in der, ausgehend von den Grundlagen der Kunstkopftechnik, Anwendungen erläutert und deren spezifische Probleme und Anforderungen dargestellt werden. An Hand von Messungen an verfügbaren Systemen wurden Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit einzelner Parameter ermittelt und untersucht. In einem Ausblick werden denkbare weitere Schritte erörtert.

Die einzelnen Abschnitte der vorliegenden Bestandsaufnahme zeigen deutlich die Handschrift der verschiedenen Autoren. Während einige Beiträge eher den Charakter eines Überblicks aufweisen, beschreiben andere detailliert Versuchsanordnungen und Versuchsergebnisse. Diese Vielfalt ist gewollt und repräsentativ für das Spektrum der Arbeiten der Arbeitsgruppe "Kunstkopftechnik".

1. Grundlagen der Kunstkopftechnik (K. Genuit, A. Schmitz)

Kunstkopfaufnahmen zeichnen sich gegenüber normalen Stereoaufnahmen durch ihre große Natürlichkeit aus. Ideale Kunstkopfaufnahmen sollten beim Abhören mit einer geeigneten Wiedergabeeinrichtung einen Höreindruck erzeugen, der fast vollständig demjenigen im natürlichen Schallfeld gleichkommt. Dazu sind sowohl bei der Aufnahme als auch bei der Wiedergabe verschiedene Details zu beachten.

Die räumliche Abbildungstreue ist um so besser, je genauer die räumliche frequenzabhängige Übertragungsfunktion von Kunstkopfaufnahme/Kunstkopfwiedergabe dem des eigenen Gehörs entspricht, das heißt je genauer der Kunstkopf und insbesondere das Außenohr dem eigenen individuellen Ohr nachgebildet ist. Das menschliche Gehör ist als adaptives System zwar in der Lage, auch mit anderen Ohren hören zu lernen, dieses Lernen ist aber umso schwieriger, je größer die Diskrepanzen sind.

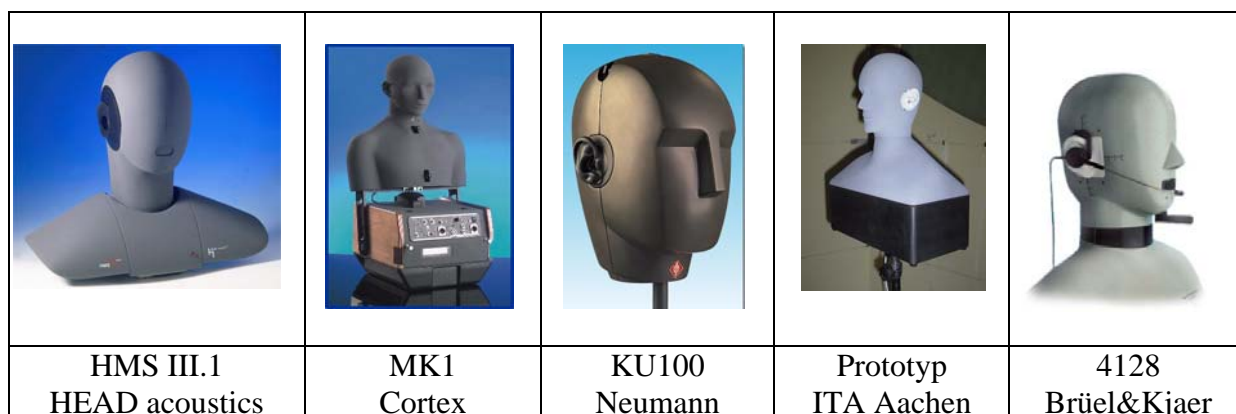


Abbildung 1.1: Verschiedene Kunstkopfkonstruktionen

1.1 Räumliches Hören (A. Schmitz)

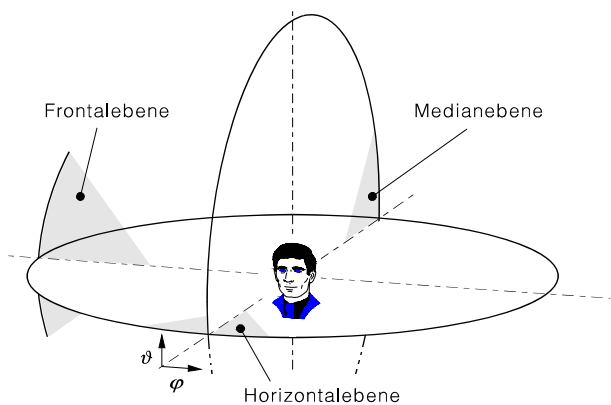


Abbildung 1.1.1: Ebenen der Hörwahrnehmung (nach Blauert (1996))

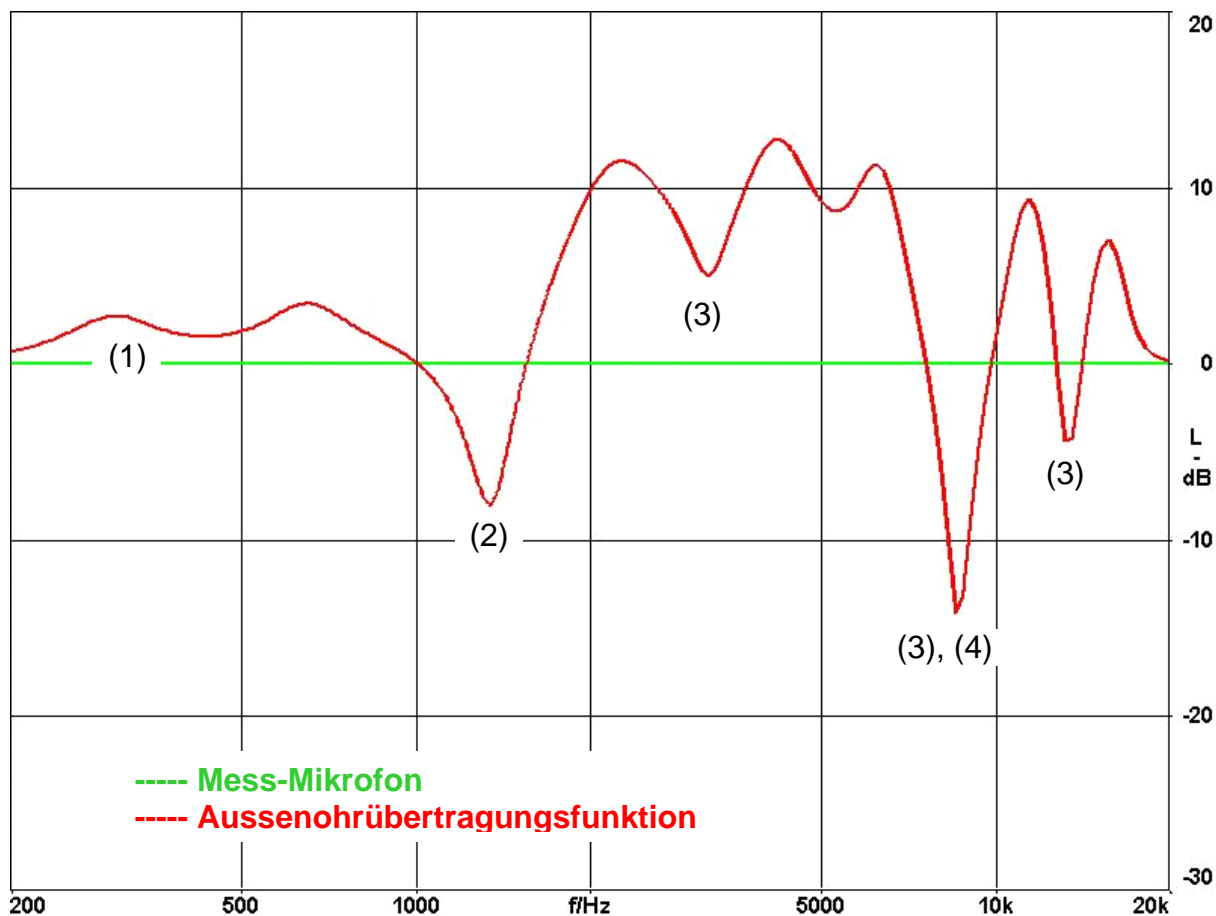
Das räumliche Hören des menschlichen Hörorgans besteht aus dem Richtungs- und Entfernungshören, sowie der Fähigkeit bei mehreren räumlich verteilten Schallquellen, die Aufmerksamkeit auf einzelne Quellen zu lenken und diese separat zu bewerten. Im Laufe unzähliger psychoakustischer Versuche (Shaw, Blauert, Genuit, Schmitz/Vorländer...) zum räumlichen Hören konnte gezeigt werden, dass bei der Bildung eines räumlichen Höreindrucks maßgeblich die Informationen beider Ohrsignale vom Gehör ausgewertet und analysiert werden. So sind für das Richtungshören in der Horizontalebene interaurale Laufzeit- und Pegeldifferenzen maßgebend, während zur Richtungsortung in der Mediane, in der die interauralen Merkmale weitgehend fehlen, eine Richtungsortung durch die spektrale Formung der Außenohrübertragungsfunktion erzielt wird (Theorie der richtungsbestimmenden Bänder nach Blauert). Andersartige Schallübertragungswege wie z. B. Schädelschwingungen, Knochenleitung, Körperschwingungen usw. sind hier im Allgemeinen von untergeordneter Bedeutung. Diese beidohrige (binaurale) Signalauswertung ist somit hinreichend für eine vollständige räumliche Empfindung.

1.2 Außenohrübertragungsfunktion (A. Schmitz)

Die räumliche Information, die in den Ohrsignalen „enthalten“ ist, entsteht prinzipiell durch Beugungs- und Reflexionseffekte der auf das menschliche Ohr eintreffenden Schallwelle. Gebeugt wird der Schall dabei maßgeblich durch die Körperstrukturen von Rumpf, Kopf und Ohrmuschel, deren Beugungs- und Reflexionsmuster für jede Schalleinfallrichtung spezifisch und unterschiedlich sind. Nachrichtentechnisch lassen sich diese Beugungseffekte als lineare Verzerrungen interpretieren, die mit Hilfe der sog. Außenohrübertragungsfunktion (AOÜF) oder international als Head-Related Transfer Function (HRTF) beschrieben werden.

Abbildung 1.2.1 zeigt ein Beispiel einer Außenohrübertragungsfunktion, gemessen bei einer Versuchsperson im linken Ohr bei frontaler Beschallung. Aus der Kurve wird deutlich, dass die Wirkung der richtungsbestimmenden linearen Verzerrungen erst oberhalb von 200 Hz bedeutsam ist. Ferner lassen sich die einzelnen Wirkungsbereiche der Körperstrukturen bereits hier ablesen. Während im tieffrequenten Bereich (< 200 Hz) aufgrund der sehr großen Wellenlänge nahezu keine Beugungs- und Reflexionseffekte und somit keine linearen Verzerrungen auftreten, wirken die geometrischen Körper wie Kopf und Schulter bereits im mittleren Frequenzbereich. Die komplex geometrische Form der Ohrmuschel bewirkt typischerweise oberhalb von 3 kHz starke Strukturierungen der Außenohr-

übertragungsfunktionen, die im Allgemeinen individuell und richtungsabhängig sehr ausgeprägt sind.



- (1) tieffrequenter Bereich, Wellenlänge $\lambda \gg$ Abmessungen des Kopfes
- (2) Schultereinbruch, destruktive Interferenz aufgrund der Schulterreflexion
- (3) Einbrüche bei $(2n-1) f_0$, $n=1,2,3,\dots$ (f_0 : $\lambda/4$ -Resonanz des Ohrkanals)
- (4) Interferenz aufgrund der Cavum conchae Reflexion

Abbildung 1.2.1: Beispiel einer gemessenen Außenohrübertragungsfunktion einer Versuchsperson, linkes Ohr, frontale Beschallung, Messposition 4mm ohrkanaleinwärts [Genuit, K., Vorlesung „Psychoakustik“ an der RWTH Aachen]

1.3 Prinzip der binauralen Aufnahme- und Wiedergabe (A. Schmitz)

Das Prinzip der binauralen Aufnahme- und Wiedergabetechnik beruht auf der Konservierung und der geeigneten Zurückspielung von Ohrsignalen. Hierbei werden die Ohrsignale mit Hilfe von Mikrofonen (ca. 4 mm einwärts) im Ohrkanal oder am Eingang des Ohrkanals aufgezeichnet. Wird die Ohrinformation geeignet an die jeweiligen Ohren zurückgespielt entsteht wiederum der naturgetreue Höreindruck. Die Aufnahmetechniken an natürlichen Ohren reichen vom Einsatz von Sondenmikrofonen, der Verwendung von Elektretkapseln in den Gehörgängen (Genuit) bis hin zur Mess- und Aufnahmetechnik mit verstopftem Ohrkanal (Møller). Die Aufnahme binauraler Ohrsignale ist nicht nur für Aufnahmewecke bei Musikdarbietungen geeignet, vielmehr hat sich in den letzten 25 Jahren auch ihr Einsatz bei der Beurteilung von Geräuschen bzw. von Lärmsituationen bewährt. Beim Zurückspielen von Ohrsignalen werden dabei vornehmlich Kopfhörer benutzt, da hiermit in einfacher Weise die

erforderliche Kanaltrennung gegeben ist. Durch geeignete Korrekturfilter ist sicherzustellen, dass die Wiedergabe an der ursprünglichen Position des Aufnahmemikrofons im Ohrkanal die gleichen Ohrsignale hervorbringt wie in der Originalsituation. Hierzu ist der frequenzabhängige Übertragungsfunktion des Kopfhörers auf dem Ohr durch eine geeignete Messung zu ermitteln und mit Hilfe eines Korrekturfilters zu kompensieren. Abbildung 1.3.1 zeigt die prinzipielle Anordnung zur Wiedergabe von Ohrsignalen über Kopfhörer (siehe auch systemtheoretische Betrachtungen).

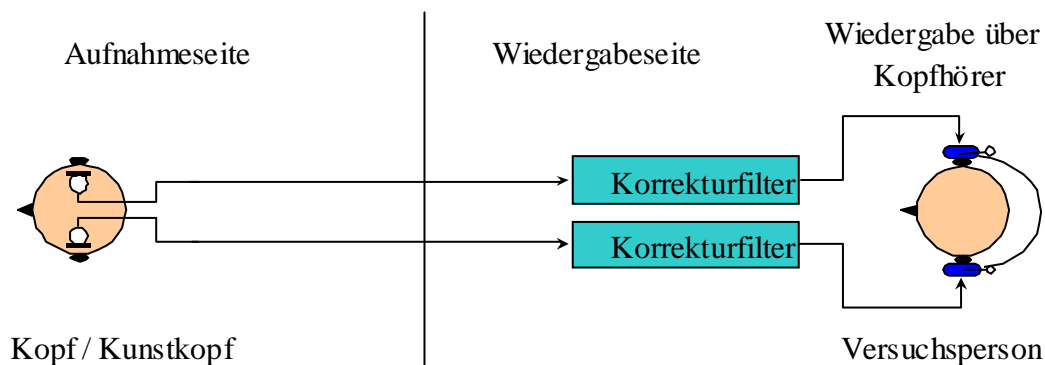


Abbildung 1.3.1: Prinzipielle Anordnung zur Wiedergabe von Ohrsignalen über Kopfhörer

Sofern der Kunstkopf nur für Hörversuche verwendet wird, ist eine Entzerrung bei der Aufnahme von untergeordneter Bedeutung. Die richtungsabhängige Filterung des Schallsignals wird von der Geometrie des Kopfes bestimmt, sie kann durch Filter nicht korrigiert werden. Ein Kunstkopf, der den menschlichen Kopf inklusive des Rumpfs perfekt nachbildet, bildet auch die richtungsabhängige Filterung nach. Betrachtet man Kunstkopf und Kopfhörer als Einheit, so ist nur zu fordern, dass am Trommelfell (bzw. im äußeren Gehörgang) des Zuhörers die gleichen Schalldrucke herrschen wenn er zum einen im Schallfeld ist bzw. zum anderen über Kunstkopf/Kopfhörer beschallt wird.

Die Definition einer *Schnittstellenübertragungsfunktion* ist jedoch sinnvoll für den Vergleich von Messungen mit Einzelmikrofonen oder für den Austausch von Einzelkomponenten z.B. Kunstkopf, Kopfhörer oder Lautsprecher.

In der Akustik sind mehrere Schallfeldtypen standardisiert: Hier interessant sind das freie Schallfeld, bei dem eine ebene Schallwelle aus definierter Richtung auf den Meßpunkt einfällt, und das diffuse Schallfeld, bei dem Schall aus allen Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit inkorärent eintrifft. Das freie Schallfeld wird mit reflexionsarmen Meßräumen nachgebildet, das diffuse Schallfeld mit Hallräumen.

Ein *freifeldentzerrter Kunstkopf* liefert bei Beschallung von vorne die gleiche frequenzabhängige Übertragungsfunktion wie ein freifeldentzerrtes Messmikrofon. Bei Beschallung aus allen anderen Richtungen ergeben sich Abweichungen der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion, die für schmalbandige Signale 30 dB und mehr betragen können. Dies ist kein Fehler des Kunstkopfes, sondern gerade die gewünschte Charakteristik. Ein *diffusfeldentzerrter Kunstkopf* liefert im diffusen Schallfeld die gleiche frequenzabhängige Übertragungsfunktion wie ein diffusfeldentzerrtes Mikrofon im diffusen Schallfeld. Die Angabe einer Beschallungsrichtung ist hier nicht sinnvoll, weil der Schall aus allen Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit einfällt.

Ein *freifeldentzerrter Kopfhörer* ergibt den gleichen Höreindruck den ein Zuhörer hätte, wenn er im freien Schallfeld exakt von vorne beschallt würde. Würde man ein elektrisches Schallsignal einmal über einen idealen Lautsprecher im reflexionsarmen Raum einer Versuchsperson von vorne vorspielen und ihr danach das gleiche Schallsignal über einen freifeldentzerrten Kopfhörer anbieten, so wäre der Klangeindruck weitgehend identisch (bei richtigem Training vorausgesetzt, siehe auch Abschnitt „Räumliches Hören“ und Zollner (1998)). Sitzt die Versuchsperson in einem diffusen Schallfeld und wird das Schallsignal über einen idealen Lautsprecher (bei frequenzunabhängiger Nachhallzeit) abgespielt, so entsteht näherungsweise der gleiche Höreindruck wie bei Darbietung über einen diffusfeldentzerrten Kopfhörer. Prinzipiell kann auch die Kombination freifeldentzerrter Kunstkopf mit freifeldentzerrtem Kopfhörer oder diffusfeldentzerrter Kunstkopf mit diffusfeldentzerrtem Kopfhörer für beide Schallfelder verwendet werden.

Sowohl Freifeld- als auch Diffusfeldbedingungen kommen in der Praxis nie in idealer Weise vor. Der Anwender hat die Aufgabe, in Abhängigkeit von der Schallfeldsituation eine Entzerrung zu wählen, die möglichst gut an das reale Schallfeld angepasst ist. Neben Freifeld- und Diffusfeldentzerrung hat sich die *ID-Entzerrung* insbesondere bei Messungen in Fahrzeugen als vorteilhaft erwiesen. Bei der ID-Entzerrung (ID: Independent of Direction) werden nur die richtungsunabhängigen Anteile (Resonanzen) der Außenohrübertragungsfunktion ausgeglichen.

Ganz andere Verhältnisse ergeben sich, wenn mit dem Kunstkopf Schallpegelmessungen durchgeführt werden sollen. Schallpegelangaben, die mit Kunstköpfen ermittelt wurden, müssen mit Vorsicht interpretiert werden. Zudem ist seit Jahrzehnten bekannt, dass der A-bewertete Schalldruckpegel zur Quantifizierung des Lautstärkeindrucks ungeeignet ist. Dieser Fehler wird auch nicht dadurch behoben, dass anstelle von Mikrofonen Kunstköpfe verwendet werden. Hingegen ist es sinnvoll, den Kunstkopf für Lautheitsmessungen zu verwenden. Das von Zwicker entwickelte Lautheitsmessverfahren (Zwicker und Fastl (1999)) geht von einer Erfassung der Schalldrucksignale durch ein Mikrofon aus.

Bei Messungen mit einem Kunstkopf, z. B. für eine originalgetreue Reproduktion der Geräusche und/oder richtungsabhängige Effekte, muss eine für die Messumgebung passende Entzerrung durchgeführt werden. Reine Freifeld- oder Diffusfeldbedingungen kommen in der Praxis nicht vor, so dass der Anwender die am besten passende Entzerrung wählen muss.

- Eine Freifeldentzerrung sollte nur dann angewendet werden, falls sich genau eine Schallquelle vor dem Kunstkopf (Elevations- und Azimutwinkel 0 Grad) im Fernfeld befindet.
- Für Messungen in reflektierenden Umgebungen ist eine Diffusfeldentzerrung zu wählen.
- Für Messungen insbesondere im Fahrzeug hat sich eine weitere Entzerrung als vorteilhaft erwiesen: Die ID-Entzerrung (ID: Independent of Direction). Bei der ID-Entzerrung werden nur die richtungsunabhängigen Anteile (Resonanzen) der Außenohrübertragungsfunktion ausgeglichen. Die Lautheitsberechnung muss dann für diffusen Schalleinfall parametrisiert sein.

Bei Messungen mit einem Kunstkopf sollte die Lautheit sowohl des rechten als auch des linken Kanals angegeben werden. Als repräsentativer Einzahlwert wird häufig das Maximum beider Kanäle verwendet.

Ein diffusfeldentzerrter Kunstkopf liefert im diffusen Schallfeld die gleichen Ergebnisse wie ein Schallpegelmessgerät mit Diffusfeld-Mikrofon. Wird ein diffusfeldentzerrter Kunstkopf im freien Schallfeld zur Schallpegelmessung verwendet, so ist bei keiner Schalleinfallrichtung ein ebener Frequenzgang der Übertragungsfunktion zu erwarten. Wenn ein freifeldentzerrter Kunstkopf im freien Schallfeld zur Schallpegelmessung verwendet wird, so ergeben sich bei Beschallung exakt von vorne die gleichen Werte wie bei einem freifeldentzerrten Messmikrofon. Auch im diffusen Schallfeld liefert ein freifeldentzerrter Kunstkopf andere Ergebnisse als ein Schallpegelmessgerät, weswegen seine Anwendung auf Schallpegelmessungen im freien Schallfeld bei Beschallung exakt von vorne begrenzt bleibt. Analog bleibt natürlich die Anwendung eines diffusfeldentzerrten Kunstkopfes auf Schallpegelmessungen im Diffusfeld begrenzt, was aber etwas *mehr Praxisrelevanz* aufweist. Übliche Räume zeigen eine Vielzahl von Wandreflexionen und ähneln somit eher einem Diffusfeld als einem Freifeld. Auch der *Innenraum eines Kraftfahrzeuges entspricht in keiner Weise einem Freifeld*.

Für alle Anwendungsfälle binauraler Aufzeichnungstechniken hat die Verwendung von natürlichen Personen als Ohrsignalproduzent erhebliche Nachteile. So sind die Verfügbarkeit einzelner Personen, die Reproduzierbarkeit der erhaltenen Signale, die lärmtechnische Belastbarkeit sowie weitere Faktoren zum Teil äußerst problematisch.

Die Idee der Kunstkopftechnologie basiert nun darauf, alle „relevanten“ geometrischen Reflexions- und Beugungskörper des menschlichen Kopfes nachzubilden, um so Ohrsignale an einem künstlichen Kopf, dem Kunstkopf, erzeugen zu können. Dieser kann dann anstelle einer natürlichen Person in nahezu jedes beliebige Schallfeld eingebracht werden und die entsprechenden Ohrsignale mit sehr hoher Reproduzierbarkeit an den Mikrofonen zur Verfügung stellen.

1.4 Individualproblem (A. Schmitz)

Bei der Konstruktion von Kunstköpfen stellt sich allgemein die Frage, anhand welcher Kriterien die eigentliche Kunstkopfgeometrie gestaltet werden soll. Aus psychoakustischen Hörversuchen ist bekannt, dass sich die Außenohrübertragungsfunktionen für die verschiedenen Schalleinfallrichtungen zwischen einzelnen Versuchspersonen zum Teil sehr deutlich unterscheiden. Møller hat die umfangreichste Untersuchung der letzten Jahre zur Messung von Außenohrübertragungsfunktionen an Versuchspersonen durchgeführt. Zwar lassen sich aus allen Funktionen einer Schalleinfallrichtung prinzipielle Kurvenverläufe ableiten, jedoch variieren die Unterschiede individuell sehr stark (bis zu 20 dB und mehr). Aufgrund zahlreicher Hörversuche mit Ohrsignalen natürlicher Personen konnte gezeigt werden, dass die räumlichen Abbildungseigenschaften beim Zurückspielen von Ohrsignalen an fremde Personen zum Teil erhebliche räumliche Abbildungsfehler verursachen. Die Kunstkopftechnik steht daher vor dem Problem, eine geeignete Versuchsperson zu finden und deren Kopfgeometrie nachzubilden, die eine gute Abbildungseigenschaft für möglichst viele Versuchspersonen ausweist. Untersuchungen der letzten Jahre. (Møller, Schmitz) haben gezeigt, dass Kunstköpfe dieser Art erheblich bessere Abbildungseigenschaften aufweisen, als solche, die nicht nach Hörversuchskriterien aufgebaut wurden.

Ein anderer Ansatz ist der aus einer Vielzahl gemessener Ohrsignale diejenigen Parameter bzw. Strukturen des Kopfes und des Ohres zu identifizieren, die maßgeblich zur Bildung räumlicher Ohrsignalkomponenten beitragen. Diese Strukturen gilt es dann geeignet zu beschreiben und geometrisch einzusetzen. Genuit hat hierzu die für das Richtungshören bedeutsamen Strukturen des Kopfes auf einfache, mathematisch beschreibbare geometrische Körper zurückgeführt. Ein aus diesen Elementen zusammengesetzter Kunstkopf ist

hinsichtlich seiner Außenohrübertragungsfunktionen dann mathematisch beschreibbar. Vorteile eines solchen Ansatzes ergeben sich hierbei im Bereich der Kalibrier- und Entzerrungstechnik.

1.5 Einteilung von Kunstkopftypen (A. Schmitz)

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Kunstköpfen für ohrferne und solchen für die ohrnahe Schallquellen. Bei der Anwendung der Kunstkopftechnik für ohrferne Schallquellen besteht keinerlei Rückwirkung des Kunstkopfes bzw. dessen Eingangsimpedanz auf das Schallfeld. Der Ohrkanal sowie die Trommelfellimpedanz, die beide keinerlei Auswirkungen auf die richtungsabhängigen Anteile der Außenohrübertragungsfunktion haben, brauchen daher nicht nachgebildet zu werden. Das Mikrofon des Kunstkopfes befindet sich in der Regel ca. 4 mm einwärts im Ohrkanal. Für ohrnahe Schallquellen (z.B. Kopfhörer) bestimmt der menschliche Ohrkanal sowie die Trommelfellimpedanz die akustische Last der Quelle und damit direkt deren abgestrahlte Leistung. Die Rückwirkung der Ohrimpedanz ist hier maßgeblich und kann nicht vernachlässigt werden. Kunstköpfe zur Messung ohrnaher Schallquellen sind daher mit einem Ohrkanalsimulator gemäß ITU-T P.57 bzw. IEC 711 ausgestattet.

1.6 Der Kunstkopf als komplexes Aufnahmemikrofon (K. Genuit)

1.6.1 Aufgaben eines Kunstkopf-Aufnahmemikrofons

Die Aufgaben eines Kunstkopf-Aufnahmemikrofons konzentrieren sich im Wesentlichen auf vier Bereiche:

1. Als Referenzversuchsperson in der Psychoakustik. Im Gegensatz zu einer Versuchsperson mit eingesetzten Sondenmikrofonen ist der Kunstkopf ein lineares, zeitinvariantes mit in allen Testsituationen unveränderten überprüfbaren Übertragungseigenschaften.
2. Als objektives Messverfahren in der akustischen Messtechnik zur Bestimmung der Übertragungseigenschaften von Kopfhörern, Telefonendeinrichtungen, Hörgeräten sowie zur Bestimmung der Schalldämmung von Gehörschützern. Für solche Anwendungen ist nicht nur erforderlich, dass das Kunstkopf-Aufnahmemikrofon ein zum menschlichen Gehör vergleichbares Richtdiagramm aufweist, auch die akustischen und mechanischen Impedanzen des Gewebes um die Ohrmuschel herum, der Ohrmuschel selbst und des Ohrkanals einschließlich Abschluss durch das Trommelfell müssen korrekt nachgebildet sein.
3. Als Kunstkopf-Messsystem in der Geräuschdiagnose und analyse sowie der Raumakustik. Hierbei besteht die Möglichkeit, Geräusche aufzuzeichnen und eine gehörmäßige Beurteilung von Geräuschen oder Lärminderungsmaßnahmen durchzuführen.
4. Als Aufnahmemikrofon im tontechnischen Bereich.

1.6.2 Anforderungen an ein Kunstkopf-Aufnahmemikrofon

Um diesen Anwendungsgebieten entsprechen zu können, ergeben sich bestimmte Forderungen an ein Kunstkopf-Aufnahmemikrofon:

1. Die Richtcharakteristik des Kunstkopfes muss der mittleren Richtcharakteristik des Menschen entsprechen.
2. Das Eigenrauschen sollte nicht wahrnehmbar sein, um Hörversuche im Bereich der Hörschwelle zu ermöglichen.
3. Die Dynamik sollte entsprechend dem menschlichen Gehör bis an die Schmerzgrenze reichen, um alle Pegelspitzen unverzerrt erfassen zu können.
4. Das System muss kalibrierfähig und kompatibel zu konventionellen Schallaufnehmern sein.
5. Der Kunstkopf sollte für ohrnahe Schallquellen über eine Impedanzanpassung verfügen.

Die erforderlichen elektrischen Komponenten des Kunstkopfmikrofons bestehen aus einem Messmikrofon, Impedanzwandler, Vorverstärker und einem Entzerrer. Ein Kunstkopf ohne Entzerrer ist nur sinnvoll in Verbindung mit einem Ohrsimulator, um Mikrofonsignale zu erhalten vergleichbar zu den Trommelfellsignalen. Für die Anwendungsbereiche 1, 3 und 4 sollten Kunstköpfe mit Entzerrung Verwendung finden. Bislang stand neben der Freifeldentzerrung auch die Diffusfeldentzerrung zur Auswahl. Beiden Bezugsbeschallungssituationen lassen sich verschiedene Vor- und Nachteile zuordnen. Ein freifeldentzerrter Kunstkopf weist bei Schalleinfall im Freifeld von vorne in Ohrkanaleingangshöhe ein konstantes, unabhängiges Übertragungsmaß wie ein Messmikrofon auf. Ein diffusfeldentzerrter Kunstkopf weist bei Beschallung im diffusen Schallfeld ein konstantes frequenzunabhängiges Übertragungsmaß auf. Dementsprechend müssen die Übertragungseigenschaften des verwendeten Wiedergabekopfhörers entweder auf das Freifeld- oder Diffusschallfeld bezogen sein. Beide Bezugsbeschallungssituationen berücksichtigen u.a. die richtungsunabhängigen Übertragungseigenschaften des Außenohres (Resonanzen durch Cavum Conchae und Ohrkanaleingang). Jedoch bei Freifeldbezug werden zusätzlich die richtungsabhängigen Übertragungseigenschaften, z.B. Reflexion und Beugung an Kopf, Schulter und Ohrmuschel des Außenohres für Schalleinfall von vorne mit erfasst, beim Bezug auf das diffuse Schallfeld erfolgt eine zusätzliche Gewichtung mit der komplexen Überlagerung von allen richtungsabhängigen Parametern des Außenohres erzeugten Schallfeldstörungen für alle Schallfeldeinfallrichtungen.

Beide Entzerrungsarten beinhalten in ihrer Definition demnach richtungsabhängige Parameter, das Freifeld für exakt die eine Schalleinfallrichtung, von vorne das Diffusfeld als Mittelwert über alle Schalleinfallrichtungen. Diesen beiden Entzerrungsarten werden weitere gegenüber gestellt, die sogenannte richtungsneutrale, vom Schallfeld unabhängige Entzerrung (ID-Entzerrung, Independent of Direction). Sie beinhaltet ausgehend von einer systemtheoretischen Beschreibung des Außenohres aufnahmeseitig die Korrektur aller richtungsunabhängigen Parameter, d.h. die von der Cavum Conchae Höhlung und dem Ohrkanaleingang erzeugten Resonanzen. Alle drei Entzerrungsarten sorgen für die gewünschte Kompatibilität des Kunstkopf-Aufnahmemikrofons zu normalen Schallaufnehmern. Diese Kompatibilität ist erforderlich, um einerseits bei Musikaufnahmen auch eine klangfarbenneutrale Wiedergabe über Lautsprecher zu erzielen und andererseits in der akustischen Messtechnik vergleichbare Ergebnisse zu erzielen bei Terzanalysen oder A-bewerteten Schalldruckpegelmessungen, die mit einem normalen Messmikrofon gewonnen wurden (siehe auch 1.3).

1.7. Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen (P. Daniel)

Die signaltheoretisch richtige Wiedergabetechnik reproduziert für alle Schalleinfallrichtungen die bei der Aufnahme vorliegenden Trommelfellsignale. Dazu ist bei Aufnahme mit einem geometrisch ideal angepasstem Kunstkopf und idealem ohrnahen Wiedergabewandler, der lediglich die Übertragungstrecke zwischen dem Wandler und dem Referenz-Aufnahmeort im Gehörgang kompensiert, keine weitere Entzerrung notwendig. Sofern allerdings Kompatibilität mit einer Wiedergabe über Lautsprecher erfolgen soll, ist die Strecke zwischen dem Lautsprecher und dem Trommelfell zu entzerren (herauszufiltern). Eine originalgetreue Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen über Lautsprecher ist in der Praxis jedoch sehr aufwendig (Neu et. al 1992), da der Raum und das Übersprechen kompensiert werden müssen (siehe 1.7.2). Theile (1981a, 1981b) zeigt, dass die Diffusfeldentzerrung die aus klanglichen Gründen bevorzugte Entzerrung ist, um Kunstkopfaufnahmen angenähert passend zu intensitätsstereofonen Signalen über Lautsprecher wiedergeben zu können. Die Kopfhörerwiedergabe hat gegenüber der Lautsprecherwiedergabe den Vorteil, dass sie nahezu unabhängig vom Wiedergaberaum ist. Dies ist umso mehr von Vorteil, wenn mehrere Versuchspersonen gleichzeitig an der Wiedergabe eines Schalles teilnehmen und die unterschiedliche Position im Raum zu sehr unterschiedlichen Höreindrücken des Signals bei Lautsprecherwiedergabe führen kann. Ein weiterer Vorteil der Kopfhörerwiedergabe ist auch eine problemlosere Reproduktion großer Lautstärken.

Eine zusätzliche Wiedergabe tiefer Frequenzen über Subwoofer - mit entsprechend der Kopfhörerübertragung eingestellter Frequenzweiche - ist in jedem Falle vorteilhaft, um die Realität der Wiedergabe durch die tieffrequenten Schwingungen / Vibrationen zu erhöhen.

1.7.1. Messung der Kopfhörerentzerrung

Auch hochwertige im Handel erhältliche Kopfhörer weisen meistens große Abweichungen von der idealen Diffusfeldentzerrung auf (Spikofski (1988) und Moeller et al. (1995)),

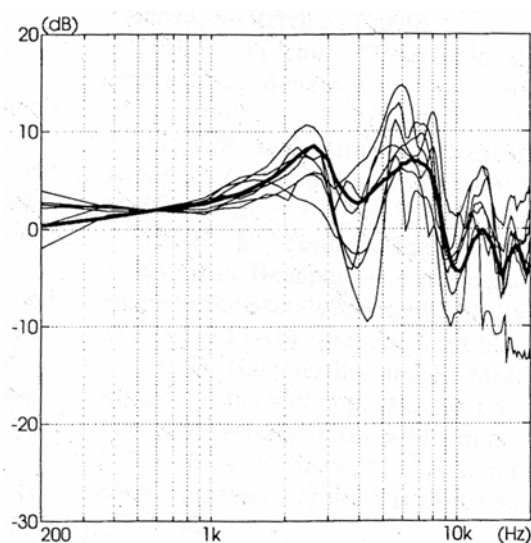


Abbildung 1.7.1.1: Diffusfeld-Entzerrungs-Vorgabe (dicke Linie) und mittlere realisierte Übertragungsfunktionen von sieben kommerziell erhältlichen „diffusfeld-entzerrten“ Kopfhörern (aus Moeller et al. 1995).

Eine korrekte Wiedergabe von Kunstkopfsignalen kann jedoch nur mit richtig entzerrten Kopfhörern gewährleistet werden. Um nicht für die jeweilige Aufnahmeentzerrung, die ja nur aus Kompatibilitätsgründen für eine Lautsprecherwiedergabe eingeführt wurde, eine eigene Kopfhörerentzerrung verwenden zu müssen, wird besser die unentzerrte Kunstkopfaufnahme als Eingangssignal für die Kopfhörerentzerrung verwendet. In einem ersten Schritt wird daher die eventuell vorliegende Aufnahmeentzerrung rückentzerrt, und in einem zweiten Schritt eine Kopfhörerentzerrung in der Art angepasst, dass der Höreindruck dem im Originalschallfeld möglich nahe kommt.

Für die Anpassung der Kopfhörerentzerrung bestehen zwei Möglichkeiten.

1. Lautstärke-Kalibrierung des Kopfhörers
2. Schalldruck-Kalibrierung der Kopfhörers

Bei beiden Verfahren wird zuerst das Originalsignal dargeboten und mit dem Kunstkopf aufgenommen. Danach wird das Kunstkopfsignal über den zu entzerrenden Kopfhörer der Versuchsperson dargeboten, die nun den Platz des Kunstkopfes (bei gleicher Ohrposition) eingenommen hat.

1.7.1.1 Pinnaeinfluss

Aus der Literatur ist bekannt, dass die spektrale Filterung der Pinna ab 6 kHz für die Lokalisierung in der Medianebene wesentlich ist (Roffler and Butler 1968, Gardner 1973, Oldfield and Parker 1984, Asano et al. 1990, Middlebrooks 1992, Butler and Musicant 1993, Abbildung 1.7.1.2).

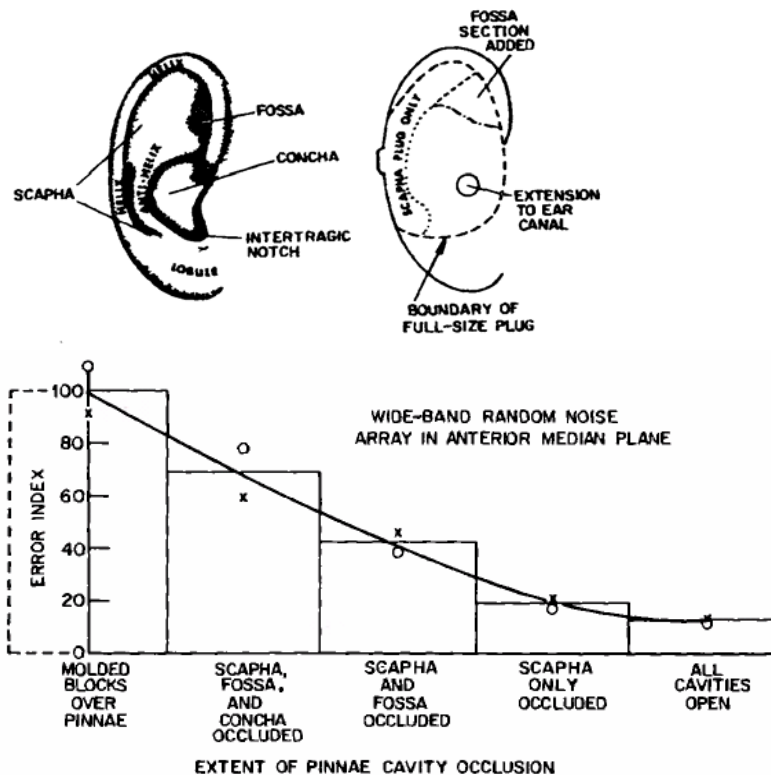


Abbildung 1.7.1.2: Darstellung der im Versuch von Garder und Gardner nacheinander abgedeckten Teile der Pinna (Scapha, Fossa und Concha) und ihre Auswirkung auf die Lokalisierung von Breitbandrauschen in der Medianebene (Abstand der Lautsprecher 4.5° ,

aus Gardner und Gardner 1973).

In diesem Bereich weist die Außenohrübertragungsfunktion besonders schmalbandige steile Einbrüche und Anhebungen auf. Beide Kalibrierverfahren sollten daher ab einer Frequenz von 6 kHz mindestens mit 1/6-Oktav, besser mit 1/9-Oktav Frequenzauflösung oder gleich in einer von der FFT-Länge vorgegebenen Frequenzauflösung durchgeführt werden.

1.7.1.2 Lautstärke-Kalibrierung

Das in DIN 45 619 Teil 1 und IEC 268-7 genormte „Freifeld-Übertragungsmaß durch Lautstärkevergleich mit einer fortschreitenden Schallwelle“ stellt allgemein die Grundlage für die Lautstärkekalibrierung von Kopfhörern dar. Für die Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen sollte jedoch wie bereits erwähnt die terzbreite Messung ab 6 kHz durch mindestens 1/6-Oktav oder besser durch 1/9-Oktav breites Rauschen ersetzt und der Versuch im diffusen Schallfeld durchgeführt werden (siehe Abschnitt: Unterschiede zwischen Lautstärke- und Sondenvergleichsmessungen). Statt des Generatorrauschsignals wird das Kunstkopfsignal der Versuchsperson, die an der Stelle des Kunstkopfes sitzt, abwechselnd mit dem Lautsprecher signal dargeboten. Die Versuchsperson regelt beide Signale auf gleiche Lautstärke ein. Aus der Pegeldifferenz wird die individuelle bzw. aus der mittleren Differenz mehrerer Versuchspersonen die mittlere Kopfhörerentzerrung gebildet. Für eine hohe Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen einer anderen Gruppe sind dabei nach Brinkmann und Richter (1987) mindestens 15 Versuchspersonen erforderlich.

1.7.1.3 Schalldruck-Kalibrierung

Bei der Schalldruck Kalibrierung wird die Entzerrung gebildet aus der Differenz der Messung mit Miniatur-Mikrofon im Ohr bei aufgesetztem Kopfhörer und der Messung mit Miniatur-Mikrofon im Ohr bei Lautsprecherdarbietung. Dabei stehen zwei verschiedene Messverfahren zur Verfügung: Miniaturmikrofon im offenen Gehörgang oder Miniaturmikrofon im verschlossenen Gehörgang (beschrieben z.B. in E DIN ISO 11904 –1).

1.7.1.4 Vorteile und Nachteile der Schalldruck- und der Lautstärke-Kalibrierung

Die Genauigkeit beider Verfahren liegt sowohl bei der Schalldruck- als auch bei der Lautstärkekalibrierung bei ca. einem dB, wobei bei der Lautstärkekalibrierung eine geübte Versuchsperson vorausgesetzt wird. Der Vorteil der Schalldruckkalibrierung liegt damit in einer größeren Genauigkeit bei ungeübten Versuchspersonen. Die Praxis zeigt jedoch, dass gerade für ungeübte Versuchspersonen die Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen über lautstärkekalibrierte Kopfhörer wesentlich originalgetreuer klingt als die Wiedergabe über schalldruckkalibrierte Kopfhörer (siehe auch Abschnitt: Messunsicherheiten durch methodische Fehler / Unterschiede zwischen Lautstärke- und Sondenvergleichsmessungen).

Ein weiterer Vorteil der Lautstärkekalibrierung ist, dass sie die Ankoppelung des Kopfhörers an das menschliche Gehör vollkommen berücksichtigt. Dies ist auch bei der Methode der Schalldruckkalibrierung mit der Methode des offenen Gehörganges gewährleistet, während dies bei der Methode des verschlossenen Gehörganges nur zum Teil berücksichtigt wird und je nach Kopfhörerbauart zu hörbaren Unterschieden führen kann. Andererseits ist der Sitz des Miniaturmikrofons bei der Methode des geschlossenen Gehörganges wesentlich einfacher zu reproduzieren.

1.7.1.5 Individuelle Wiedergabeentzerrung

Moeller et al. (1996) fanden selbst bei Winkelauflösungen von 45° eine Halbierung der Lokalisierungsfehler in der Medianebene bei Verwendung von individuellen Ohrmikrofonaufnahmen zusammen mit einer individuellen Kopfhörerentzerrung. Ab ca. 6 kHz weist die Außenohrübertragungsfunktion besonders starke individuelle Anhebungen und steile Einbrüche auf, die besonders für die Lokalisierung in der Medianebene wichtig sind und durch eine individuelle Entzerrung berücksichtigt werden können. Eine Kunstkopfaufnahme kann jedoch maximal nur für eine Richtung optimal entzerrt werden. Auch bei der individuellen Entzerrung bietet sich die Entzerrung im Diffusfeld an, um die Unterschiede über alle Raumrichtungen zu minimieren.

1.7.2 Wiedergabe mit Lautsprechern (M. Vorländer)

Eine Wiedergabe über Kopfhörer erfüllt vom technischen Aspekt wie Frequenzunabhängigkeit der Übertragungsfunktion und Kanaltrennung zwar am ehesten die Bedingungen, erreicht jedoch in der subjektiven Wahrnehmung vieler Hörer oft nicht das optimale Ergebnis. Es tritt hier oft eine „Im-Kopf-Lokalisation“ auf, deren Entstehung noch nicht vollständig geklärt ist, aber a) in einer nicht perfekten Entzerrung und b) in Effekten des Ohrverschlusses zu suchen ist. Zudem bewirken Kopfhörer eine unnatürliche Situation, da sie das Ohr abdecken, was der Versuchsperson bewusst ist, und so den psychologischen Eindruck mindert, dass es sich um ein reales, externes Schallsignal handelt. Aus diesen Gründen ist für einige Anwendungen (Auralisation, psychoakustische und medizinische Untersuchungen zur Wahrnehmung) eine Wiedergabe über Lautsprecher angezeigt.

Bei der herkömmlichen Stereo-Lautsprecherwiedergabe kommt es jedoch zu einem hier unerwünschten Übersprechen der Kanäle. Die Übertragungswege müssten derart entzerrt sein, dass das Signal für das linke Ohr nur im linken Ohr und das Signal für das rechte Ohr nur im rechten Ohr zu hören ist.

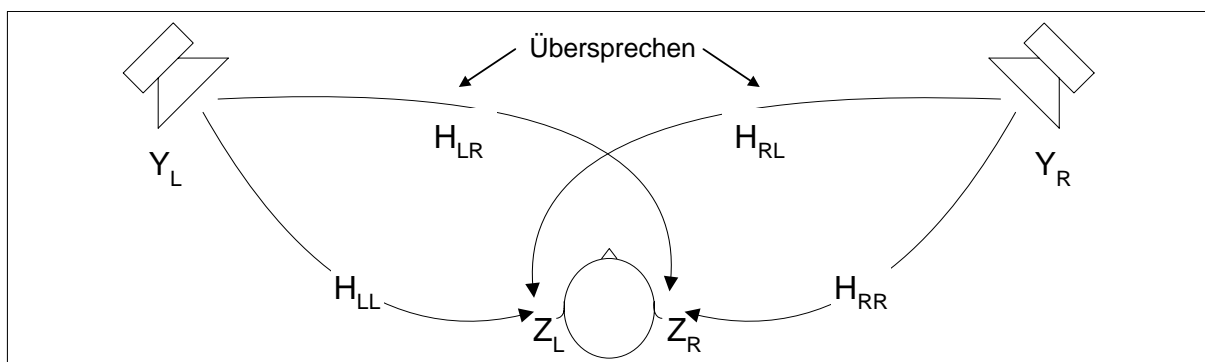


Abbildung 1.7.2.1: Übertragungswege bei der Lautsprecher-Wiedergabe

Die mit H_{LR} und H_{RL} gekennzeichneten Übertragungswege stellen das Übersprechen dar. Es muss nun durch eine geeignete Filterung versucht werden, genau diese Signalanteile zu kompensieren. Dieses Verfahren wird als Übersprechkompensation bezeichnet (Atal und Schröder (1967)).

Zunächst wird ein kurzer Impuls (1) über den linken Lautsprecher abgestrahlt. Durch die Laufzeitdifferenz kommt der Impuls (1') am rechten Ohr etwas verzögert an. Zusätzlich tritt durch die Abschattung des Kopfes eine frequenzabhängige Abschwächung auf. Gibt man über den rechten Lautsprecher genau dieses Signal phaseninvertiert aus, dass die Pulse 1 und 2

zeitgleich am rechten Ohr anliegen, wird die Kompensation des Störimpulses ($1'$) erreicht. Das Kompensationssignal (2) spricht allerdings auch wieder auf das linke Ohr über ($2'$), das eine erneute Kompensation durch den linken Lautsprecher erfordert (3). Es ist also theoretisch eine unendliche Anzahl an Iterationen nötig. Da jedoch durch die Kopfabstrahlung eine Pegelreduktion verursacht wird, klingen die Kompensationssignale zunehmender Ordnung ab und ein Abbruch der Iteration ist möglich.

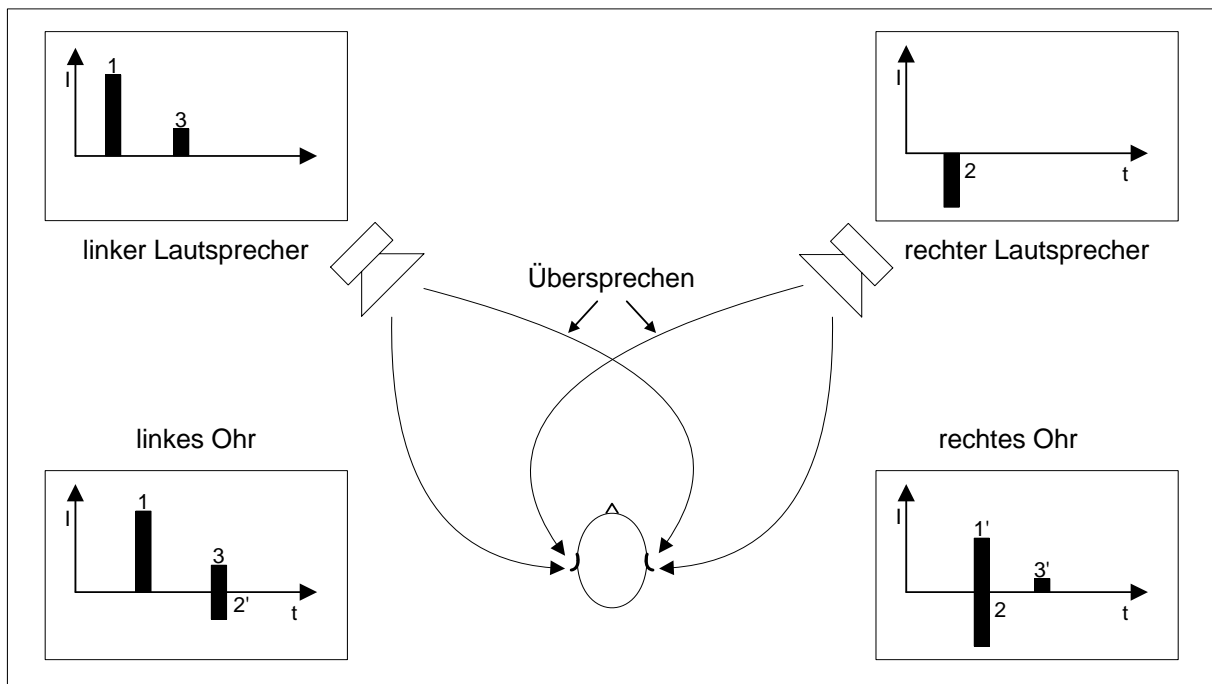


Abbildung 1.7.2.2: Übersprechkompensation

Für eine mathematische Betrachtung des Problems eignet sich jedoch die von Moeller (1989) vorgestellte geschlossene Lösung besser. Sie basiert auf Kunstkopfmessungen der Übertragungswege, die in Abbildung 1.7.2.3 mit H_{LL} , H_{LR} , H_{RL} und H_{RR} gekennzeichnet sind. Beide Lösungen lassen sich ineinander überführen (siehe unten).

Ziel ist es, die Signale Y_L und Y_R im Vorhinein so zu bearbeiten, dass sich eine Kompensation der unerwünschten Übertragungswege (H_{LR} , H_{RL}) ergibt. Die Forderung, binaurale Signale am Ohrkanal zu reproduzieren drückt sich in den Bedingungen $Z_L = X_L$ und $Z_R = X_R$ aus.

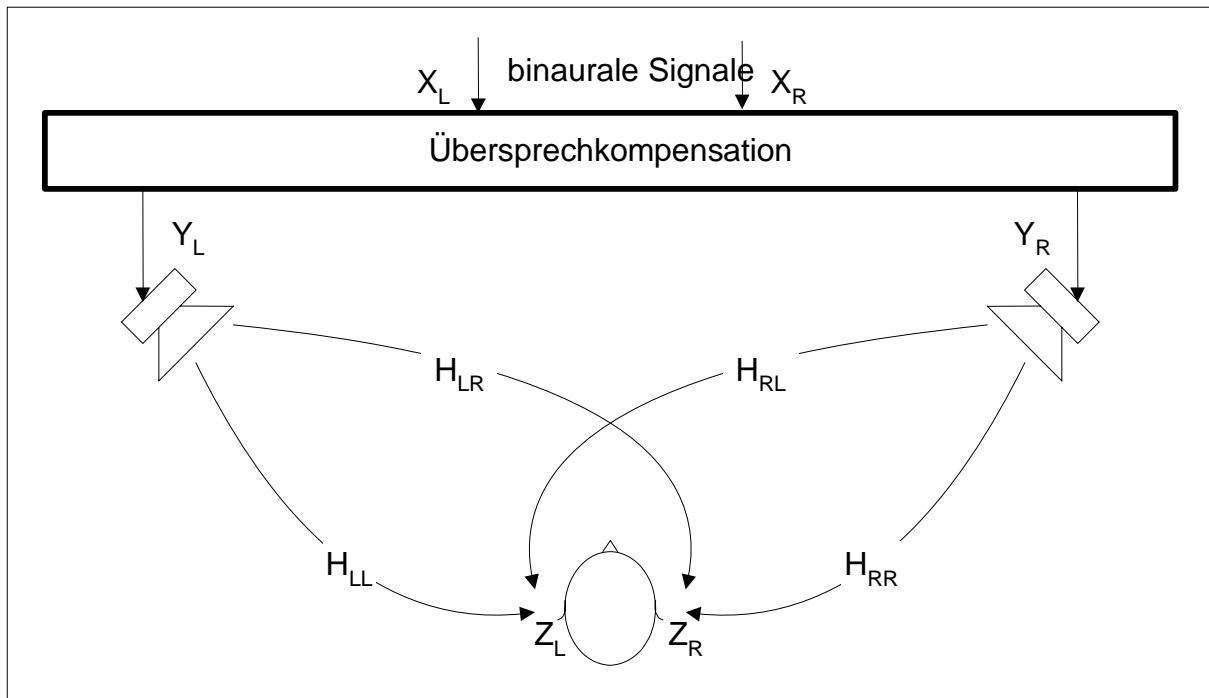


Abbildung 1.7.2.3: Vorgeschaltete Übersprechkompensation

Dabei bedeutet:

$X_L(f)$, $X_R(f)$: Eingangssignal.

$Y_L(f)$, $Y_R(f)$: Lautsprechersignal.

$Z_L(f)$, $Z_R(f)$: Ohrsignale.

$H_{LL}(f)$: Übertragungsfunktion vom linken Lautsprecher zum linken Ohr.

$H_{LR}(f)$: Übertragungsfunktion vom linken Lautsprecher zum rechten Ohr.

$H_{RL}(f)$: Übertragungsfunktion vom rechten Lautsprecher zum linken Ohr.

$H_{RR}(f)$: Übertragungsfunktion vom rechten Lautsprecher zum rechten Ohr.

$L(f)$: Übertragungsfunktion linker Lautsprecher.

$R(f)$: Übertragungsfunktion rechter Lautsprecher.

Für die Ohrsignale Z_L und Z_R ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$Z_L = Y_L \cdot (L \cdot H_{LL}) + Y_R \cdot (R \cdot H_{RL}) = X_L \quad (1.7.2.01)$$

$$Z_R = Y_R \cdot (R \cdot H_{RR}) + Y_L \cdot (L \cdot H_{LR}) = X_R \quad (1.7.2.02)$$

Dieses Gleichungssystem enthält zwei Unbekannte und lässt sich nach Y_L und Y_R auflösen:

$$Y_L = \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{H_{RR}}{H_{LL} \cdot H_{RR} - H_{LR} \cdot H_{RL}} \cdot X_L - \frac{H_{RL}}{H_{LL} \cdot H_{RR} - H_{LR} \cdot H_{RL}} \cdot X_R \right] \quad (1.7.2.03)$$

$$Y_R = \frac{1}{R} \cdot \left[\frac{H_{LL}}{H_{LL} \cdot H_{RR} - H_{LR} \cdot H_{RL}} \cdot X_R - \frac{H_{LR}}{H_{LL} \cdot H_{RR} - H_{LR} \cdot H_{RL}} \cdot X_L \right] \quad (1.7.2.04)$$

Für die Beziehungen zwischen den Eingangssignalen X und den Ausgangssignalen Y kann man nun ein Blockschaltbild angeben, welches die einzelnen Wege im System beschreibt:

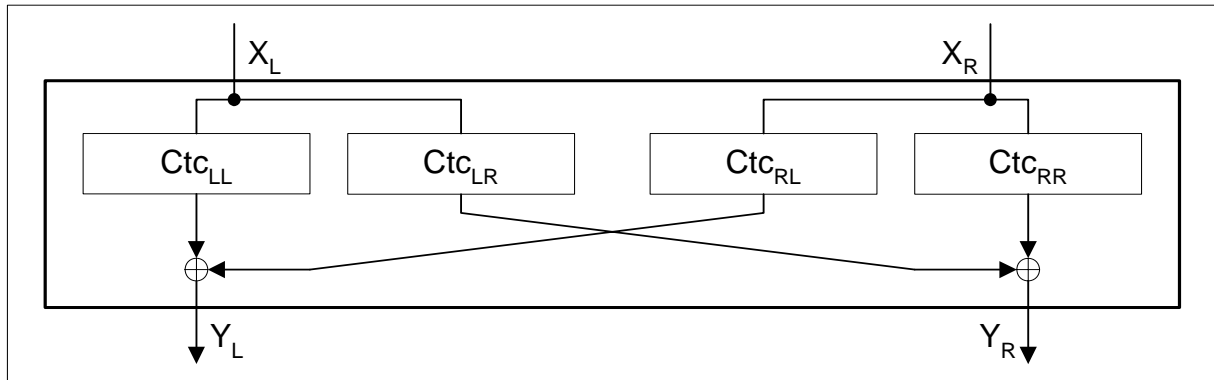


Abbildung 1.7.2.4: Wege im System der Übersprechkompensation

Die Kompensation gilt allerdings nur für die Position, bei der die Übertragungswege gemessen und die entsprechenden Filter berechnet wurden. Hier liegt der große Nachteil: man kann sich nicht frei bewegen, was die Anwendbarkeit stark einschränkt.

Mit steigender Prozessorleistung hat man heute allerdings die Möglichkeit, die Übersprechkompensation dynamisch nachzuführen. Man stellt dann, abhängig von der momentanen Position und Orientierung der Abhörperson, ein gültiges Filter zur Verfügung. Im Rechner ist eine Datenbank abgelegt, die alle Informationen für die Berechnung der Kompensationsfilter enthält. Dabei handelt es sich um die Messungen der Übertragungswege der beiden Wiedergabelautsprecher zu den Ohrmikrofonen eines Kunstkopfes und um die Außenohrübertragungsfunktionen.

Die Software wählt anhand der eingelesenen Positionsdaten (Headtracker) die benötigten HRTFs aus und berechnet daraus den Kompensationsfiltersatz. Ist die Berechnung abgeschlossen, wird das Signal mit dem jetzt gültigen Filter bearbeitet und wiedergegeben.

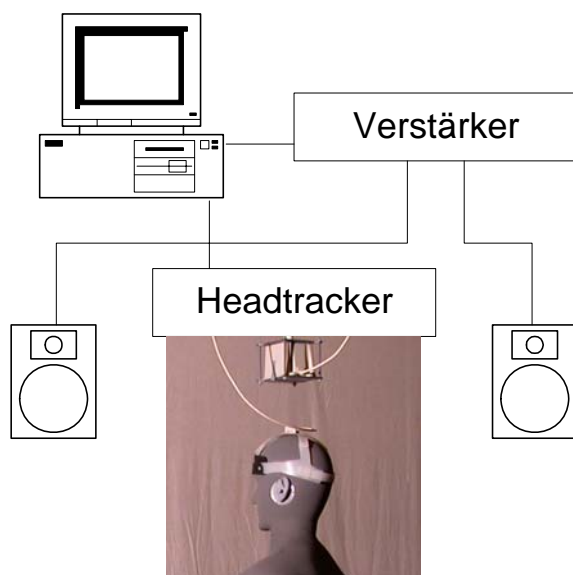


Abbildung 1.7.2.5: Headtracker

2. Anwendungen der kopfbezogenen Messtechnik

Während anfangs die Kunstkopf-Messtechnologie lediglich zur originalgetreuen akustischen Konservierung von Schallereignissen diente, entstanden sehr bald daraus Anwendungsmöglichkeiten in nahezu allen Bereichen der akustischen Messtechnik. Die Erweiterung der herkömmlichen Messtechnik um die zusätzlichen Aspekte einer gehörgerechten Schallmesstechnik bedeutet nicht automatisch auch eine Erhöhung der Kosten für Lärminderungsmaßnahmen oder Geräuschreduzierungsvorhaben. Im Gegenteil, dadurch, dass gezielt Geräuschanteile erkannt werden, die für einen unangenehmen Geräuscheindruck oder die Belästigung durch Lärm verantwortlich sind, können häufig aufwendige breitbandige Schallminderungsmaßnahmen vermieden werden.

2.1. Fahrzeugtechnik (K. Genuit)

2.1.1 Messung der Vorbeifahrgeräusche eines Kraftfahrzeuges

Obwohl die gesetzlichen Vorschriften bezüglich des maximal zulässigen Schalldruckpegels bei der Vorbeifahrtmessung deutlich reduziert wurden, ist insgesamt die Lärmbelastung durch Kraftfahrzeuge in der augenblicklichen Zeit gestiegen. Schon direkt nach der Einführung der Kunstkopf-Messtechnik im Automobilbereich fielen große Unterschiede auf zwischen der objektiven Messtechnik bei der Vorbeifahrt-Messung und der subjektiven Beurteilung einer durchgeführten Kunstkopf-Aufnahme. Hier wurde erstmalig auffällig, dass die konventionelle A-bewertete Schalldruckpegelmessung, die durchaus geeignet ist, sicherzustellen, dass das menschliche Gehör durch Lärm physikalisch nicht geschädigt wird, für eine derartige Messung, wie die Bestimmung des Vorbeifahrgeräusches eines PKW's, nicht geeignet ist. Da bislang an diesen Messvorschriften festgehalten wird, sind die Automobilhersteller gezwungen, Fahrzeuge zu entwickeln, die diesen Messvorschriften genügen, sie müssen daher aber nicht unbedingt subjektiv leiser oder angenehmer sein.

2.1.2 Kraftfahrzeug-Innengeräusch

Der Einsatz der Kunstkopf-Messtechnik zur Beurteilung der Geräuschsituation im Kraftfahrzeuginnenraum stellte sich von Anfang an als die Hauptanwendung dar, weil im Kraftfahrzeuginnenraum eine äußerst komplexe Geräuschsituation besteht, basierend auf der komplexen Überlagerung von zahlreichen unterschiedlichen Geräuschursachen, die über unterschiedliche Übertragungswege zum Ohr der abhörenden Person im Kraftfahrzeuginnenraum gelangen. Aufgrund des räumlichen Auflösungsvermögens des menschlichen Gehörs in Verbindung mit der ausgeprägten Selektivität, sich auf einzelne Schallquellen und deren zeitlichen Strukturen und spektralen Mustern konzentrieren zu können, entsteht gerade in dieser Anwendung die signifikante Überlegenheit der Kunstkopf-Messtechnologie im Vergleich zur konventionellen Messtechnik. Die vielen unterschiedlichen Geräuscharten, die durch diverse Zusatzaggregate im Kraftfahrzeuginnenraum akustisch hörbar werden können, lassen sich eigentlich nur noch mit Hilfe der gehörrechtlichen Schallaufnahme unter Einbeziehung eines Kunstkopf-Messsystems sinnvoll analysieren. Bislang ist es allerdings nur möglich, in einer Wechselbeziehung zwischen objektiver Messtechnik und subjektiver Klassifizierung die Beurteilung der von Einzelkomponenten abgestrahlten Geräuschanteile zu bestimmen, indem z.B. mit Hilfe der digitalen Signalverarbeitung die Kunstkopf-Signale im Zeit- oder Frequenzbereich so manipuliert werden, dass eine sinnvolle messtechnische Bestimmung möglich wird. Das Wissen um die binaurale Signalverarbeitung insbesondere unter Berücksichtigung der Selektionsfähigkeit des

Gehörs ist bislang noch nicht so vervollständigt, dass anhand einer Kunstkopf-Messung im Kraftfahrzeuginnenraum direkt z.B. das Getrieberasseln, Generatorpfeifen, Reifenheulen usw. bestimmt werden könnten.

Typische Anwendungen der gehörrichtigen Schallanalyse bei Kraftfahrzeuginnengeräusche sind Windgeräusche, Getrieberasseln, Motorrauigkeit, Reifengeräusche, Quietsch- und Klapperereignisse, Türzuschlaggeräusch sowie alle Geräuschanteile hervorgerufen von diversen, insbesondere elektrisch betriebenen Hilfsaggregaten (Lichtmaschine, Scheibenwischer, Scheibenheber, Belüftung, Sitzverstellung usw.).

2.1.3 Geräuschdesign

Schall ist nicht grundsätzlich unerwünscht, Schall überträgt auch Information. Sind diese Informationen gewünscht oder angenehm, wird auch das Schallereignis als angenehm beurteilt. Der Geräuschcharakter muss zum Charakter des Produkts einerseits aber auch zu der Vorstellung des Anwenders andererseits passen. Von daher wird die Aufgabe des Akustikers zunehmend auch in die Richtung eines sogenannten Sounddesigners verändert. Diese Fragestellung ist erheblich komplexer als die reine Beurteilung einer Geräuschqualität, da hier kognitive Aspekte bei der Beurteilung mit einfließen. Die Frage lautet nicht nur "Wie groß ist der A-bewertete Schalldruckpegel, die Lautheit, die Rauigkeit, die Schärfe, die Schwankungsstärke usw.?", sondern die Fragestellung wird erweitert um "was erwartet der Kunde, welche Einstellung hat er zum Produkt?". Diese komplizierte Aufgabenstellung lässt sich sehr eindrucksvoll an der Fragestellung hinsichtlich sportlichen oder komfortablen Sound erläutern. Der Motorensound kann einerseits durch die Ansauganlage aber insbesondere durch die Abgasanlage beeinflusst werden. Mit Hilfe der gehörrichtigen Schallaufnahme werden Kunstkopf-Aufnahmen erstellt, die für die gehörrichtige Beurteilung über Kopfhörer zur Verfügung stehen und mit Hilfe der digitalen Signalverarbeitung durch Beeinflussung der zeitlichen Strukturen oder der spektralen Zusammensetzungen zunächst so manipuliert werden, dass ein ganz bestimmtes akustisches Merkmal, z.B. Sportlichkeit subjektiv empfunden wird. Mit Hilfe der digitalen Signalverarbeitung ist es nun durchaus möglich, sogar ein dynamisches Geräuschdesign durchzuführen, d. h. einzelne Ordnungspegel in ganz bestimmten Drehzahlbereichen bezüglich der Amplitude dynamisch zu verändern. Diese Manipulationen müssen sehr sorgfältig durchgeführt werden. Ein sportlicher oder auch kraftvoller Eindruck kann entstehen, indem eine einzelne Motorordnung durch Hinzufügen bzw. Verstärken der benachbarten halben Motorordnungen geringfügig moduliert wird. Werden z.B. die benachbarten Ordnungen in einem Pegelverhältnis zur eigentlichen Motorordnung von -10 dB - 20 dB gehalten, so klingt diese Art von Rauigkeit durchaus angenehm kraftvoll. Wird der Pegel der benachbarten Ordnungen weiter erhöht, so schlägt diese Rauigkeit in eine unangenehme Empfindung über.

2.2. Gerätetechnik (H.-P. Grabsch)

Auch bei Haushaltsgeräten, Gartengeräten, Elektrogeräten und -werkzeugen oder Aggregaten unterschiedlicher Art bietet sich der Einsatz von Kunstköpfen an. Dies gilt insbesondere dann wenn Geräte durch Anhören bewertet oder verglichen werden sollen. (s. Sounddesign). Ein vollständigen Ersatz der herkömmlichen Mikrofonmesstechnik kann es aus verschiedenen Gründen nicht geben. Normen, z. B. zur Schalleleistungsbestimmung, oder Pflichtenhefte sehen in den meisten Fällen Mikrofone vor. Bedingt durch die gewollte Direktivität der Kunstköpfe ist die Positionierung der Köpfe und die Auswertung schmalbandiger hochfrequenter Signalanteile sehr sorgfältig durchzuführen (s. HRTF). Die Kunstköpfe sollten

in einer typischen, der Anhörsituation gleichen Position aufgestellt werden. Dies bringt in der Praxis z. B. bei Elektrowerkzeugen einige Schwierigkeiten: Befestigung des Werkzeuges oder fehlende Reflexion und Beugung durch einen Torso (s. Zollner Knie anheben); so dass oft auf Kopfbügelmikrofone zurückgegriffen wird. Gibt es keine typische Anhörsituation, sollte der Kunstkopf entsprechend der Ausdehnung der Quelle eher weiter weg stehen, um lokale Einflüsse zu vermeiden. Entzerrungen und Positionen müssen eindeutig dokumentiert werden. Messwerte, die aus Kunstkopfsignalen gewonnen werden, müssen entsprechend gekennzeichnet sein. Insbesondere die Verknüpfung der Messwerte der beiden Seiten, z. B. bei der Lautheit, wird oft unterschiedlich gehandhabt. Um weniger die Raumcharakteristik der Messumgebung mit Kunstköpfen zu erfassen bzw. vergleichende Messungen an unterschiedlichen Orten zu ermöglichen, sollte, außer bei Standardeinbauten von Hausgeräten oder ähnlichem, in reflexionsarmen Räumen aufgenommen werden. Bei wichtigen Entscheidungen muss die Übertragbarkeit der Bewertung von Kunstkopfaufnahmen einer bestimmten Aufnahmesituation auf "Live"-Darbietungen sowohl bei Experten als auch im Feld bei den Endkunden gezeigt werden.

2.3. Raumakustik (M.Vorländer)

Der Einsatz von Kunstköpfen in der Raumakustik hat die wesentlichen Fortschritte beim Verständnis zum Hören in Räumen ermöglicht. Zu Zeiten, in denen die Raumakustik als eine Art besonderer Magie oder Kunstform angesehen war, war man angewiesen auf Erfahrungswerte durch Befragungen des Konzertpublikums und auf aufwändige Hörversuche „vor Ort“. Mit den bahnbrechenden Arbeiten der Göttinger Gruppe um Gottlob (1973) und Siebrasse (1973) und der Berliner Gruppe um Lehmann und Wilkens (Lehmann (1975) und gab es schließlich einen deutlichen Gewinn an systematischen wissenschaftlichen Erkenntnissen. Beide Gruppen verwendeten Kunstkopfaufnahmen zur Konservierung binauraler Schallsignale und zur Durchführung von psychoakustischen Vergleichsstudien im Labor. Mit Hilfe dieser Versuche und den Experimenten in künstlichen Schallfeldern war es möglich, elementare beschreibende Größen zur „Hörsamkeit“ zu finden, welche die Dimensionen des Hörens in Räumen widerspiegeln. Diese Arbeiten sind im übrigen, was die methodische Untersuchung zur Wahrnehmung komplexer Schallfelder angeht, Vorreiter für die heute etablierte Disziplin „Sound Quality“. Ebenso wie damals für die Raumakustik steht die Identifikation der wesentlichen und voneinander unabhängigen Geräuschparameter im Zentrum des Interesses, und die konsequenten weiteren Maßnahmen zur Verbesserungen der Raumakustik sind ein Vorbild für heute selbstverständliche Vorgehensweisen beim „Sound Design“.

Einige raumakustische Parameter, z.B. zur Charakterisierung von Nachhall und zur Transparenz, sind nur auf die Zeitstruktur von Abklingvorgängen bezogen und bedürfen keiner räumlich korrekten Messung und Interpretation. Als ein jedoch besonders wichtiges Kriterium hat sich der sog. Räumlichkeitseindruck (engl.: Spatial Impression) herauskristallisiert. Wenn alle anderen raumakustischen Parameter in optimalen Bereichen liegen, aber der Räumlichkeitseindruck mangelhaft ist, ist das Musikerlebnis unbefriedigend. Es ist für die Akustik eines Konzertsaals in der Tat wesentlich, dass der Schall nicht ausschließlich vom Podium herzukommen scheint, sondern dass sich der Zuhörer von Schall eingehüllt fühlt, ohne die Fähigkeit der Ortung der Schallquelle zu verlieren. Dieser subjektive Eindruck eines räumlich ausgedehnten Schallfelds beruht auf dem binauralen Hören und vermittelt in pauschaler Form einen Eindruck von der Dreidimensionalität des Schallfelds in einem Raum.

Der Räumlichkeitseindruck wird durch seitlich eintreffende inkohärente Raumreflexionen und damit verbundene interaurale Laufzeit- und Pegelunterschiede verursacht. Architekten und raumakustische Planer legen daher großen Wert auf eine möglichst den Seitenschall fördernde Raumgeometrie oder andere Maßnahmen wie z.B. die „Weinbergterrassen“ der Berliner Philharmonie.

Zur Messung des Räumlichkeitseindrucks werden zwei alternative Strategien verfolgt. Die eine basiert auf einer indirekten Methode und dient zur Erfassung der seitlichen Schallbeiträge in der Raumimpulsantwort mit Hilfe von Gradientenmikrofonen (Barron (1971)). Die andere dient direkt zur Messung der interauralen Merkmale mit Hilfe von Kunstköpfen.

Im wesentlichen auf Arbeiten von Ando (1977) gestützt und von Beranek (1992) zusammengefasst, auch im Vergleich mit anderen Arbeiten, wurde in der internationalen Messnorm ISO 3382 (1995) festgelegt, dass der so genannte Interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient IACC bestimmt wird aus der interauralen Kreuzkorrelationsfunktion IACF:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \quad (2.3.01)$$

$$IACC_{t_1, t_2} = \max \left[IACF_{t_1, t_2}(\tau) \right] \quad (2.3.02)$$

und $-1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms}$. Dabei sind $p_r(t)$ und $p_l(t)$ die an den Ohren eines Kunstkopfes (oder einer Versuchsperson) gemessenen bandpassgefilterte Schalldruck-Impulsantworten, die für die betreffende Sender-Empfänger-Kombinationen geeignet zu ermitteln sind. Mit der Wahl von t_1 und t_2 kann zwischen den subjektiven Dimensionen „Umhülltsein“ (LEV = listener envelopment) ($t_1 = 80 \text{ ms}$, $t_2 = \text{Nachhallzeit}$) und dem Eindruck der scheinbaren Schallquellenausdehnung (ASW = apparent source width) ($t_1 = 0$, $t_2 = 80 \text{ ms}$) unterschieden werden.

Zur Messung des IACC werden Standard-Kunstköpfe vorgesehen, die auf den heute verfügbaren Normen IEC/TR 60959 sowie auf ITU-T P.58 basieren.

2.4. Messung der Schallimmission durch ohrnahe Schallquellen (T. Fedtke)

Zu den ohrnahen Schallquellen gehören z. B. Kopfhörer, aber auch Telefone, Hörgeräte und elektronische Gehörschützer, insgesamt alle Schallquellen, bei denen die Ankopplung an das Ohr und seine Rückwirkung für die Kunstkopf-Messtechnik von ausschlaggebender Bedeutung sind. Ihre Schallimmission am Trommelfell, die generisch nur durch einen Lautheitsvergleich oder durch das Einbringen von Sondenmikrofonen in den Gehörgang von Versuchspersonen gemessen werden kann, ist mit Hilfe von Kunstköpfen mit relativ wenig Aufwand messbar. Dabei gilt es aber insbesondere die adäquate Ankopplung der Schallquellen an den im Kunstkopf integrierten Ohrsimulator zu beachten. Dazu sieht die Norm ISO 11904-2 "Acoustics-Determination of sound immissions from sound sources places close to the ears - Part 2: Technique using a manikin" vor, den Schallgeber einer ohrnahen Schallquelle auf einen Kunstkopf zu setzen und die an dessen Ohrsimulator erzeugten Kunstkopf-Schalldruckpegel $L_{M,exp,f}$ in Terzbändern zwischen 100 Hz und 10 kHz zu messen. Diese Kunstkopf-Schalldruckpegel werden dann mit Hilfe einer frequenzabhängigen Kunstkopf-Übertragungsfunktion $\Delta L_{ff,f}$ in Einheiten des freien Schallfeldes $ffr-L_f$ umgerechnet:

$$ffr-L_f = L_{M,exp,f} - \Delta L_{ff,f} \quad (2.4.1)$$

Die Terzpegel $ffr-L_f$ werden schließlich mit der Frequenzbewertung $A_f / 1/$ beaufschlagt und dann energetisch zu einem äquivalenten Freifeld-Schalldruckpegel $ffr-L_{Aeq}$ aufsummiert:

$$ffr-L_{Aeq} = 10 \lg \left\{ \sum 10^{\frac{ffr-L_f + A_f}{10 \text{dB}}} \right\} \text{dB} \quad (2.4.2)$$

Zur Zeit stehen drei kommerziell erhältliche Kunstköpfe mit einer Nachbildung des Gehörganges und der Trommelfell-Impedanz zur Verfügung: Typ KEMAR der Firma Knowles Electronics, Typ 4128 der Firma Brüel & Kjaer und Typ HMSII.4n der Firma Head acoustics. Sie werden im folgenden mit KK1, KK2 und KK3 bezeichnet. Jeder dieser Kunstköpfe kann sowohl mit einer härteren (h) als auch mit einer weicheren (w) - d. h. im Material nachgiebigeren - Pinna-Nachbildung ausgerüstet werden (jeweils linkes Ohr: KK1: h-150704L, w-DB066; KK2: h-DZ9626, w-DZ9752; KK3: h - nicht hinterschnitten, w - hinterschnitten).

An drei mit Rosa Rauschen betriebenen supraauralen Kopfhörern, wurden Messungen der Schallimmission am Trommelfell durchgeführt. Der geschlossene Kopfhörer KhA1 kam aus dem Bereich der Audiometrie (Andrückkraft $F_{an}=4,5\text{N}$, Durchmesser $D=7\text{cm}$), die beiden offenen Kopfhörer KhU1 und KhU2 kamen aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik ($F_{an}=1,0$ und $1,1\text{ N}$, $D=$ je 4cm).

Zunächst wurden bei allen drei Kunstköpfen in einem reflexionsfreien Raum die frequenzabhängige Übertragungsfunktion $\Delta L_{ff,f}$ für die 0° -Einfallsrichtung jeweils an den harten und an den weichen Pinna-Nachbildungen bestimmt. Als Testschall diente Rosa Rauschen. Dann wurden die drei Kopfhörer nacheinander auf die mit den weichen Pinnae ausgerüsteten Kunstköpfe gesetzt und mit dem gleichen Testschall die Kunstkopf-Schalldruckpegel $L_{M,exp,f}$ gemessen. Alle Messungen wurden mit Hilfe eines Real-Time Analysers Norsonic 840 durchgeführt. Die Kalibrierung der Messanordnungen erfolgte

jeweils mit Hilfe eines Pistonphones und verschiedenen, zu den Kunstköpfen gehörenden Adaptern.

Im folgenden werden Messergebnisse jeweils für die linken "Ohren" der 3 Kunstköpfe angegeben. Für die rechten "Ohren" ergaben sich vergleichbare Daten.

Die Freifeld-Frequenzgänge $\Delta L_{ff,f}$ der 3 Kunstköpfe für harte und für weiche "Pinnae" sind in Abbildung 2.4.1 wiedergegeben. Die Wiederhol-Standardabweichung betrug etwa 0,2 dB. Als Orientierungshilfe sind zusätzlich die von der International Telecommunication Union (ITU) genormten Sollwerte und Toleranzen [ITU-T (1996)] für Kunstköpfe zur Messung von Telefon-(Kopf)hörern eingetragen.

Die Kunstkopf-Schalldruckpegel $L_{M,exp,f}$ der Kopfhörer wurden nach Gleichung (2.4.1) zu einem mit Hilfe der individuell gemessenen, zum anderen mit Hilfe der von der ITU genormten Freifeld-Frequenzgänge der Kunstköpfe in Freifeld-bezogene Kunstkopf-Schalldruckpegel $ffr-L_f$ (re 1Pa) umgerechnet. Diese wurden dann auf terzbreit-gefilterte Eingangssignalpegel des Rosa Rauschens von $1 V_{eff}$ bezogen. Durch diesen Bezug ergibt sich das bekannte Freifeld-Übertragungsmaß G_F (re 1Pa/V) der Kopfhörer. Als Beispiele sind in Bild 2 die so an den linken "Ohren" der 3 Kunstköpfe ermittelten Freifeld-Übertragungsmaße (mit ITU-Freifeldkorrektur) für die Kopfhörer KhA1 und KhU1 dargestellt. Die Wiederhol-Standardabweichung betrug $<0,7$ dB für 125 Hz bis 4 kHz, $< 2,2$ dB darüber. Zusätzlich wurden die in früheren Untersuchungen [3,4] an 16 Testpersonen mit Hilfe von Gehörgangsmikrofonen ermittelten Freifeld-Übertragungsmaße eingezeichnet.

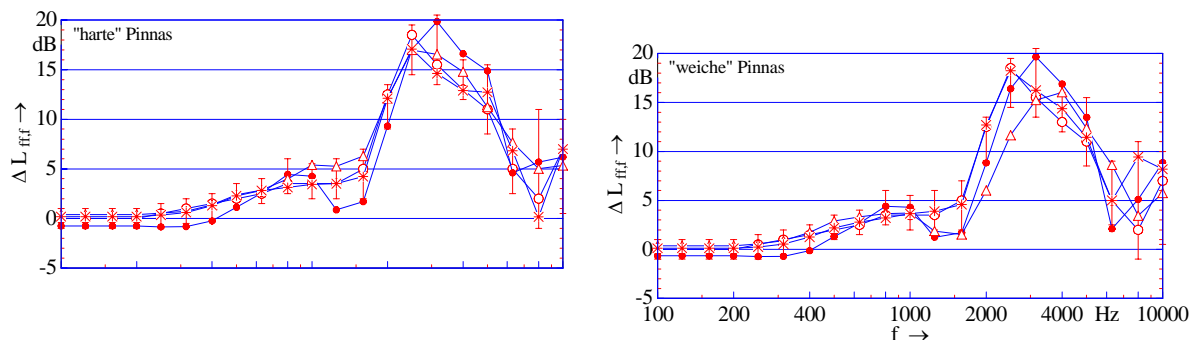


Abbildung 2.4.1: Freifeld-Frequenzgänge $\Delta L_{ff,f}$ der Kunstköpfe KK1*---*, KK2 Δ --- Δ und KK3 \bullet --- \bullet (jeweils linkes "Ohr") sowie Werte und Toleranzen nach /ITU-T (1996)/ o---o

Für alle 3 Kopfhörer wurde sodann als Testsignal ein Rosa Rauschen mit einem konstanten Pegel pro Terz von $0,1 V_{eff}$ zwischen 100 Hz und 10 kHz angenommen und nach Gleichung (2.4.2) aus den Freifeld-Übertragungsmaßen die A-bewerteten äquivalenten Freifeld-Schalldruckpegel $ffr-L_{Aeq}$ berechnet. Die Ergebnisse, berechnet zum einen mit Hilfe der individuell gemessenen Freifeld-Frequenzgänge (indiv. entz.), zum anderen mit Hilfe der von der ITU genormten frequenzabhängigen Freifeld-Übertragungsfunktion (nach Norm entzerrt) sind in Tabelle 2.4.1 zusammengefasst. Mit eingetragen sind die äquivalenten Freifeld-Schalldruckpegel, die sich aus den mit Testpersonen gemessenen Freifeld-Übertragungsmaßen ergeben.

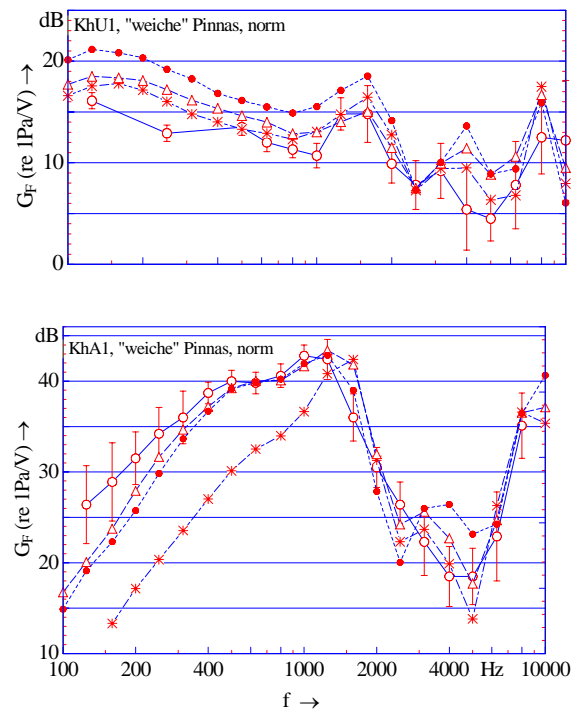
Tabelle 2.4.1 Äquivalente Freifeld-Schalldruckpegel $f_{fr}\text{-}L_{Aeq}$ von 3 s.a. Kopfhörern (Kh) bei Ansteuerung mit Rosa-Rausch-Signalpegeln von $0,1 V_{eff}$ pro Terz, gemessen mit Kunstköpfen (KK) mit individueller bzw. normierter Freifeld-Entzerrung sowie mit Hilfe von 16 Testpersonen

Messung mit	$f_{fr}\text{-}L_{Aeq}$ (re 1Pa) in dB		
	KhA1	KhU1	KhU2
KK1, indiv. entz.	(27,0)	4,0	14,3
KK2, indiv. entz.	31,2	6,2	16,8
KK3, indiv. entz.	30,1	(7,9)	(17,9)
Testpersonen	28,9	3,1	14,2
KK1, norm. entz.	(27,2)	4,6	14,7
KK2, norm. entz.	29,6	4,7	15,5
KK3, norm. entz.	29,1	(6,5)	(16,7)

Aus den Messergebnissen lassen sich für supraaurale (s.a.) Kopfhörer folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Die Freifeld-Frequenzgänge ein und desselben Kunstkopfes mit "harter" und "weicher Pinna" können sich um bis zu 9 dB (KK1, 8 kHz), die Freifeld-Frequenzgänge der 3 Kunstköpfe mit "weicher Pinna" können sich um bis zu 7 dB (2 kHz, 2 kHz) unterscheiden (Abbildung 2.4.2).
- Für s.a. geschlossene Kopfhörer erscheint die Pinna-Nachbildung des Kunstkopfes KK1 für Frequenzen unter 1600 Hz zu steif. Für s.a. offene Kopfhörer ist sie dagegen gut geeignet. Für kleine s.a. offene Kopfhörer erscheint die Pinna-Nachbildung des Kunstkopfes KK3 zu glatt. Sie bewirkt dadurch einen unnatürlich dichten Sitz (Abbildung 2.4.2).
- Bei Umrechnung der Kunstkopf-Schalldruckpegel von Kopfhörern in Einheiten des freien Schallfeldes mit Hilfe einer genormten frequenzabhängigen Freifeld-Übertragungsfunktion treten geringere Streuungen auf als bei Umrechnung mit Hilfe der individuell gemessenen Freifeld-Frequenzgänge (Tabelle 2.4.1). Dies gilt - gemittelt über alle Frequenzen - auch für die Freifeld-Übertragsmaße der Kopfhörer.
- Bezogen auf das Messergebnis an Testpersonen streuen die äquivalenten Freifeldschalldruckpegel (normiert entzerrt) der Kunstköpfe -unter Vernachlässigung jeweils der nicht geeigneten "Pinnas"- um maximal 1,6 dB (Tabelle).

Abbildung 2.4.2: Freifeld-Übertragungsmaße G_F der Kopfhörer KhA1 und KhU1, gemessen an den Kunstköpfen KK1*---*, KK2 Δ --- Δ und KK3•---• (jeweils weiche, linke "Pinnas", normierte Freifeld-Entzerrung nach /2/) sowie mit Hilfe von 16 Testpersonen o---o



2.5. Messungen an Hörgeräten (T. Niederdränk, Übersetzung: T. Fedtke)

Einer der ersten Kunstköpfe für die Messtechnik war der, ursprünglich für Hörgerätemessungen entwickelte, KEMAR (Knowles-Electronics Manikin for Audiologic Research, [Burkhard (1975)]) in den frühen siebziger Jahren. Seit seiner ersten Beschreibung und der Markteinführung 1972 haben viele Audiologen und andere Forscher die Eigenschaften von Hörgeräten mit Hilfe von Kunstköpfen untersucht.

Es wurde eine Messpuppe entwickelt, die die mittleren Abmessungen des erwachsenen Menschen nachbildete. Die Ohrnachbildung entspricht den akustischen Eigenschaften des menschlichen Kopfes indem Außenohr, Gehörgang und Trommelfell dem mittleren Ohr hinsichtlich der Abmessungen, der akustischen Impedanz und der sich ausbildenden Moden gleichen. Die Abmessungen des Torsos und des Kopfes beruhen auf anthropometrischen Daten, das äußere Ohr jedoch auf speziell für diesen Zweck bestimmten Daten. Der Gehörgang und das Trommelfell werden durch den Zwislocki-Kuppler repräsentiert. Es hat sich herausgestellt, dass der Schalldruck am Ohreingang relativ wenig von der Oberfläche oder der Impedanz der Kopfhaut abhängt. Mittels Validierungsmessungen wurde nachgewiesen, dass die frequenzabhängige Freifeld-Übertragungsfunktion der Messpuppe dem des mittleren Menschen entspricht. Insbesondere sind Beugungseffekte an Kopf und Körper entsprechend nachgebildet, was mit der Einführung von Hörgeräten mit Richtmikrofonen sehr wichtig wurde.

Zusätzlich zu den ohrbezogenen Messungen, die von verschiedenen Kunstkopf-Anwendungen bekannt sind, wurden zahlreiche Untersuchungen des Schallfeldes in der Nähe der Kopfoberfläche durchgeführt [Kuhn (1977)]. Ausgelöst durch die Entwicklung am Kopf getragener Hörgeräte mussten die Entwickler von Hörgeräten die Schalleinlässe der Mikrofone so anordnen, dass die Richtwirkung optimiert wurde. Da für "Hinter-dem-Ohr-Hörgeräte" (HdO) das Schallfeld an verschiedenen Positionen am Ohr oder in der Nähe des Ohres wichtig ist, stellte die Einführung einer Messpuppe einen Meilenstein für die Hörgeräteversorgung dar.

Auf Grund der Beugungseffekte am Kopf kann man eine natürliche Richtwirkung, bekannt von den Außenohr-Übertragungsfunktionen (Head-Related Transfer Functions, HRTF) feststellen. Trotzdem liegt bei typischen HdO-Messungen die Position über dem Ohr anstelle im Ohr, während der Hörer des Hörgeräts akustisch an den Kuppler, welcher das Restvolumen des verschlossenen Gehörgangs repräsentiert, angekoppelt ist. Bild 2.5.1a zeigt das Richtdiagramm eines KEMAR, gemessen mit einem Hörgerät ohne Richtwirkung. Das Mikrofon befand sich dabei über dem rechten Ohr.

Falls ein HdO-Gerät mit Richtmikrofonen in einer Reihe über dem rechten Ohr angebracht wird, addieren sich die Richtwirkungen des Kopfes und des Richtmikrofons. In Bild 2.5.1b werden Freifeld- und KEMAR-Messungen des Richtdiagramms eines Hörgerätes mit Richtwirkung, ausgestattet mit einem Gradientenmikrofonsystem, verglichen. Betrachtet man die Position der Nase des Hörgerätes als Bezugsrichtung, wird das Richtdiagramm des HdO-Gerätes bedingt durch die Beugung am Kopf zur Seite verschoben. Um eine maximale Richtverstärkung für den Schwerhörenden zu erreichen, wäre eine Verschiebung des Richtdiagramms nach vorn wünschenswert. Diese kann durch eine optimierte Mikrofonposition erreicht werden. Selbst für moderne digitale Hörsysteme ist eine optimale Positionierung der Mikrofone grundlegend wichtig. Bild 2.5.2 zeigt z.B. Untersuchungen an einem Hörgerät mit einem Richtmikrofon zweiter Ordnung. In diesem Fall sind die durch den

Kopf verursachten Verzerrungen von Amplitude und Phase viel größer als für Gradientenmikrofone.

In Bild 2.5.3 ist das mit einem in ein Hörgerät eingebauten Richtmikrofon zweiter Ordnung (Mikrofonabstand 8 mm) gemessene Richtdiagramm bei einer Frequenz von 2 kHz dargestellt. Der Vergleich mit einem stark optimierten Richtmikrofon erster Ordnung stellt klar den Nutzen der Unterdrückung von Schall aus rückwärtiger und seitlicher Richtung für den Schwerhörenden heraus.

Im Bereich der Hörgeräte sind konventionelle Messverfahren immer noch sehr verbreitet (IEC 60118). Wegen der stark nichtlinearen Eigenschaften moderner in Hörgeräten verwendeter Signalverarbeitungsmethoden werden Messungen unter quasi-stationären Bedingungen mit sinusförmigen Anregesignalen durchgeführt. Insbesondere für die Untersuchung von Algorithmen zur Unterdrückung von Hintergrundgeräuschen werden dabei zur Berücksichtigung der eigenen Sprachverständlichkeit auch Kunstköpfe mit künstlichem Mund eingesetzt. Obwohl Korrelations- oder auf Sprache bezogene Ansätze vermehrt für eine objektivere Einschätzung verschiedener Aspekte von Hörgeräten verwendet werden, ist im allgemeinen die traditionelle Art und Weise der Hörgeräteprüfung noch sehr verbreitet. Mittels Bezugsmessungen unter Freifeldbedingungen bei abwesendem Kopf wird der Schalldruckpegel des Anregeschallfeldes an der Position des Kopfmittelpunktes konstantgehalten. Die Messpuppe wird in dieses Schallfeld eingebracht um die Über-alles-Funktion des HdO-Gerätes zu messen. Folglich sind Messungen an Kunstköpfen ein grundlegend wichtiger Teil der Überprüfung und Entwicklung moderner Hörsysteme.

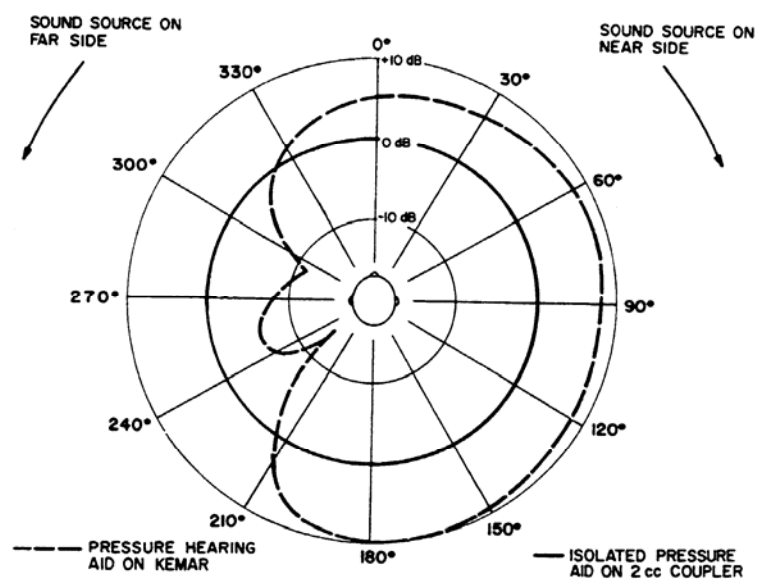


Bild 2.5.1a: Richtdiagramm eines Hörgerätes ohne Richtwirkung am rechten Ohr des KEMAR im Vergleich zum Freifeld ($f = 2 \text{ kHz}$)

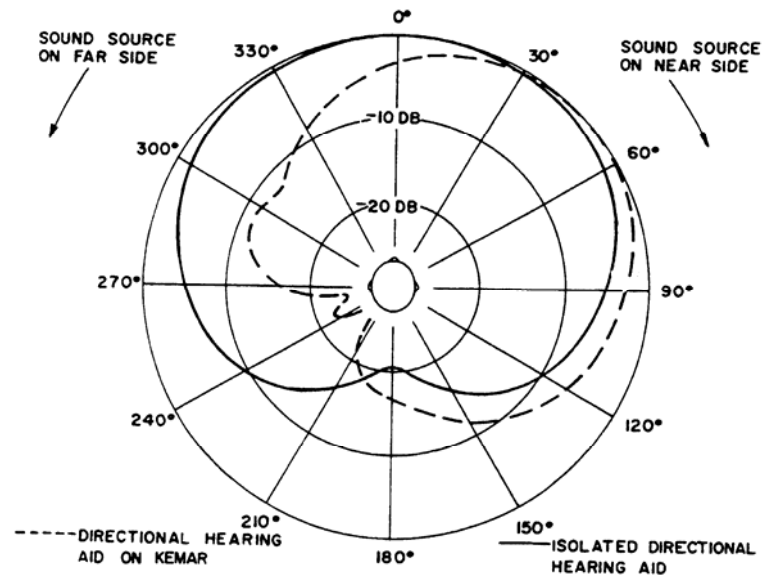


Bild 2.5.1b: Richtdiagramm eines Hörgerätes mit Gradientenmikrofon am rechten Ohr des KEMAR im Vergleich zum Freifeld ($f = 2 \text{ kHz}$)

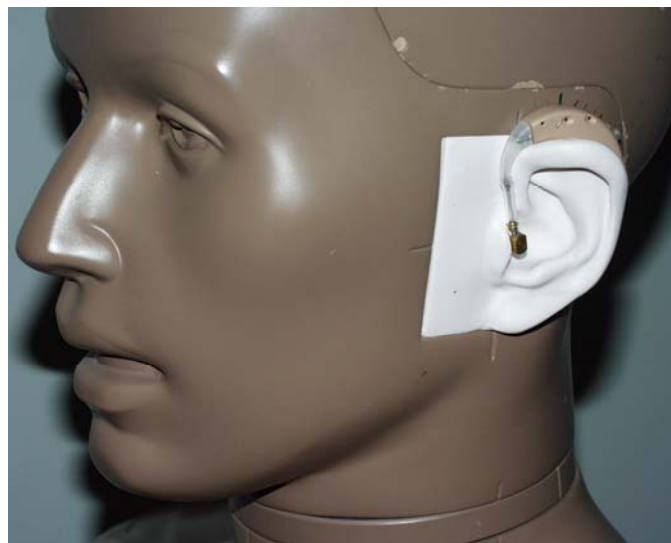


Bild 2.5.2: Digitales Hörgerät mit Richtmikrofon zweiter Ordnung am KEMAR

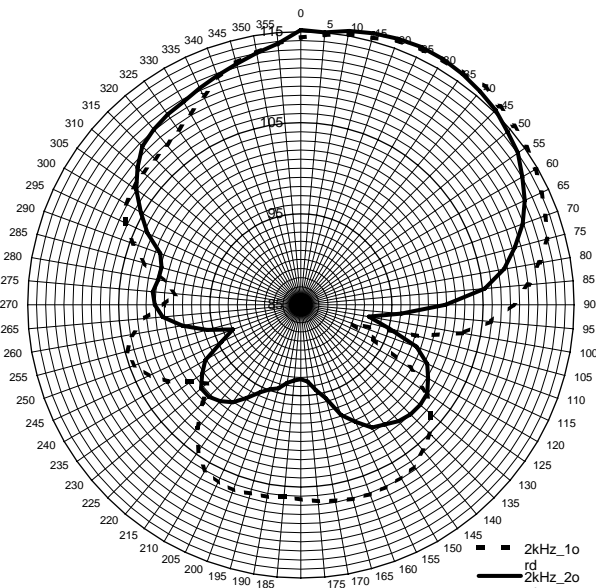


Bild 2.5.3: Richtdiagramm von Hörgeräten mit Richtmikrofonen erster und zweiter Ordnung am KEMAR

2.6. Messungen an Gehörschützern (T. Fedtke)

Die Schalldämmung von Gehörschützern wird üblicherweise dadurch bestimmt, dass die Hörschwelle von Versuchspersonen in einem künstlichen diffusen Schallfeld einmal mit und einmal ohne getragenen Gehörschutz gemessen wird. Der so erhaltene frequenzabhängige Dämmwert wird als REAT(f) [Real Ear Attenuation at Threshold] bezeichnet. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die in Hörschwellennähe gemessenen Dämmwerte auch für den Einsatz bei höheren Schalldruckpegeln gelten, solange die Gehörschützer linear arbeiten. Das ist bei passiven Gehörschützern i.a. bis zu Schalldruckpegeln von 170 dB (re 20 μ Pa) der Fall, solange sie nicht spezielle Vorrichtungen aufweisen, die nichtlineares Verhalten auslösen sollen (z.B. Systeme kleiner Bohrungen etc). Einzige Ausnahme sind tiefe Frequenzen, bei denen die mit der Hörschwellenmethode ermittelte Schalldämmung durch eine Maskierung der Schwelle bei getragendem Gehörschutz verfälscht wird. Ursache dafür sind physiologische Vorgänge, wie z.B. Blutströmung und Muskelbewegung. Damit wird die Schalldämmung bei diesen Frequenzen durch die Schwellenmethode überschätzt. Werte für diesen Einfluss sind allgemein bekannt und können bei der Einschätzung der Schutzwirkung berücksichtigt werden.

Die Schallminderung durch Gehörschützer an Kopfnachbildungen wird, abweichend von der Schalldämmung nach der Schwellenmethode, als Einfügedämmung IL(f) [Insertion Loss] bezeichnet.

‘Aktive Gehörschützer’ finden zunehmend Verbreitung. Sie können hinsichtlich ihres Wirkprinzips in zwei Gruppen sortiert werden: Gehörschützer mit Schallwiedergabeeinrichtung (sound restoration systems) und Gehörschützer mit aktiver Lärmkompensation (active noise reduction systems, ANR). Während erstere passive Schalldämmung mit einer (geregelten resp. im Pegel begrenzten) Schallübertragung kombinieren und ihre Dämmung im passiven Modus durch einfaches Ausschalten der elektronischen Baugruppen problemlos mit der Schwellenmethode gemessen werden kann, ist bei den ANR-Systemen das Eigenrauschen der Elektronik stets präsent und macht die

Hörschwellenmessung unbrauchbar. Damit bleibt als Ausweg nur die Messung mit Kopfnachbildungen. In den folgenden Beispielen werden Untersuchungen an einem Kapselgehörschützer mit aktiver Lärmkompensation gezeigt. Als Kopfnachbildungen fanden HMS II.4n (Head Acoustics), 4128 (Brüel&Kjaer) sowie eine ATF (acoustic test fixture) nach ISO 4869-3 Verwendung.

In einem künstlichen diffusen Schallfeld nach DIN ISO 4869-1 wurde folgender Meßablauf realisiert: Die Kopfnachbildung wurde ohne Gehörschützer mit breitbandigem rosa Rauschen (Schalldruckpegel 103 dB re 20 μ Pa) angeregt, und das Terzspektrum wurde mit einem Echzeitanalysator über einen Zeitraum von 120 s gemittelt. Sodann wurden die jeweiligen Gehörschützer dreimal aufgesetzt und die Spektren in gleicher Weise bestimmt. Das Aufsetzen der Gehörschützer erfolgte sorgfältig, jedoch ohne Optimierung auf maximale Schalldämmung. Die Einfügedämmung der Gehörschützer wurde als arithmetisches Mittel aus den Differenzen zwischen den drei Messungen mit Gehörschützer und der Messung ohne Gehörschützer berechnet.

Die zur Verfügung stehenden Kopfsimulatoren bildeten die Eigenschaften des natürlichen Kopfes in sehr verschiedener Güte nach. Während die in ISO 4869-3 genormte Testanordnung lediglich den Ohrabstand und die Kopfhöhe des mittleren menschlichen Kopfes aufwies, waren die Kunstköpfe mit Pinnae, Gehörgangnachbildungen und IEC-711-Simulatoren für den abgeschlossenen Gehörgang ausgestattet. Der HMS II.4n besaß zusätzlich künstliches Fleisch rund um die Ohrnachbildungen zur Simulation der mechanischen Impedanz der Haut und des Gewebes.

Bei der Modellierung des natürlichen Kopfes durch Kunstköpfe werden nicht alle für die Schalldämmung relevanten Eigenschaften erfasst. Insbesondere die Effekte der Knochenleitung und des Verschlusseffektes werden durch die derzeitig zur Verfügung stehenden Kunstköpfe nicht berücksichtigt. Schroeter und Pösselt haben für diese Effekte, ebenso wie für den Einfluss der Maskierung durch physiologisches Rauschen bei der Schwellenmethode, Modelle entwickelt und geben eine Berechnungsvorschrift an [Schroeter (1986)]. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich die durch Luft- und durch Knochenleitung übertragenen Einzelschalle in Phase befinden. In der vorliegenden Untersuchung wurden diese Modelle und Verfahren verwendet, um aus den Ergebnissen der Schwellenmessung unter Berücksichtigung der o.g. bekannten und quantifizierbaren Effekte Vergleichswerte für die Einfügedämmung zu berechnen.

Bei dem untersuchten Gehörschützer handelte es sich um einen Kapselgehörschützer mit eingebautem ANR-System.

Die Abbildungen 2.6.1 bis 2.6.3 zeigen die Einfügedämmung des Gehörschützers an den drei Kopfnachbildungen jeweils einmal im passiven Modus (ANR-System ausgeschaltet) und einmal im aktiven Modus (ANR-System eingeschaltet). Zusätzlich ist die aus den Messwerten nach der Schwellenmethode wie oben beschrieben berechnete zu erwartende Einfügedämmung im passiven Modus dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Übereinstimmung zwischen Kunstkopfmessung und Schwellenmessung im passiven Modus mit der Nachbildungsgüte der Kopfnachbildungen zunimmt. Während bei der ISO 4869-3-Testanordnung z.T. beträchtliche Unterschiede auftreten, ist die Annäherung durch den komplexesten Kunstkopf (HMS II.4n) am besten.

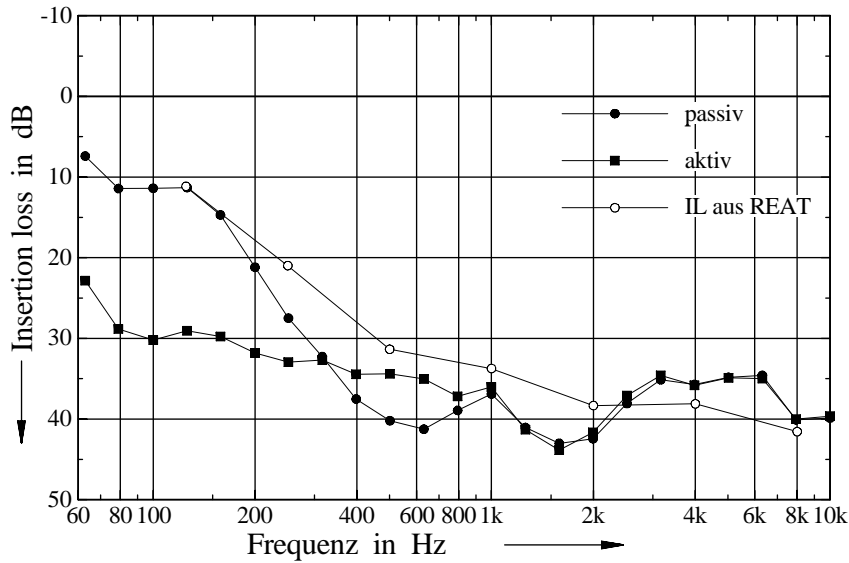


Abbildung 2.6.1: Einfügedämmung (Insertion loss) des ANR-Gehörschützers im passiven und im aktiven Modus sowie aus der Schwellenmessung (REAT) berechnete Einfügedämmung (IL) an der Testanordnung (ATF) nach ISO 4869-3

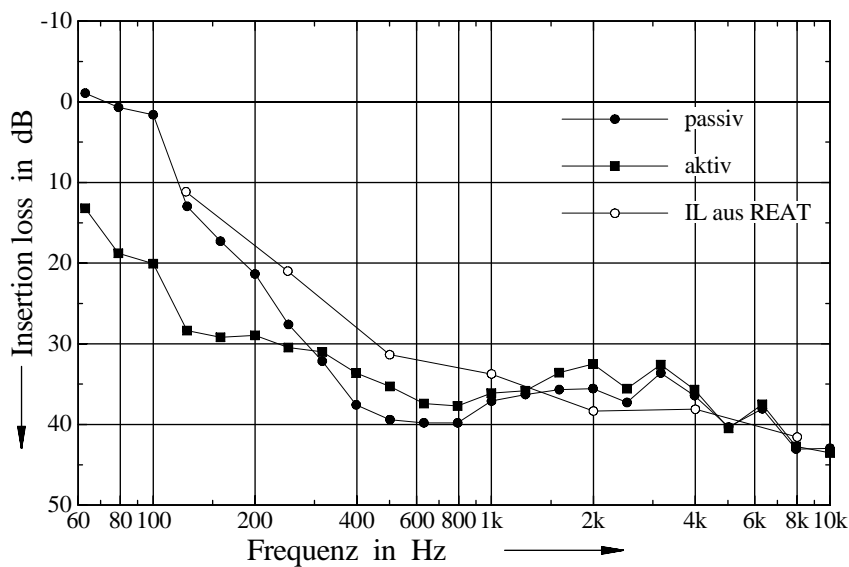


Abbildung 2.6.2: Einfügedämmung (Insertion loss) des ANR-Gehörschützers im passiven und im aktiven Modus sowie aus der Schwellenmessung (REAT) berechnete Einfügedämmung (IL) am Kunstkopf B&K 4128

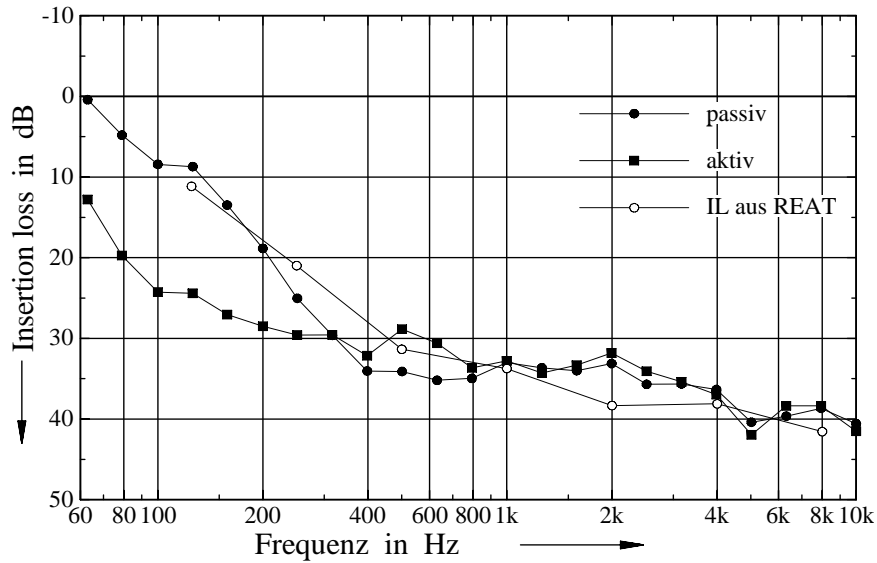


Abbildung 2.6.3: Einfügedämmung (Insertion loss) des ANR-Gehörschützers im passiven und im aktiven Modus sowie aus der Schwellenmessung (REAT) berechnete Einfügedämmung (IL) am Kunstkopf Head Acoustics HMS II.4n

Die aktive Lärmunterdrückung ist nur bei Frequenzen unterhalb von 400 Hz maßgeblich. In Abbildung 2.6.4 ist die Differenz der Einfügedämmungen zwischen aktivem und passivem Modus für alle drei Kopfnachbildungen dargestellt.

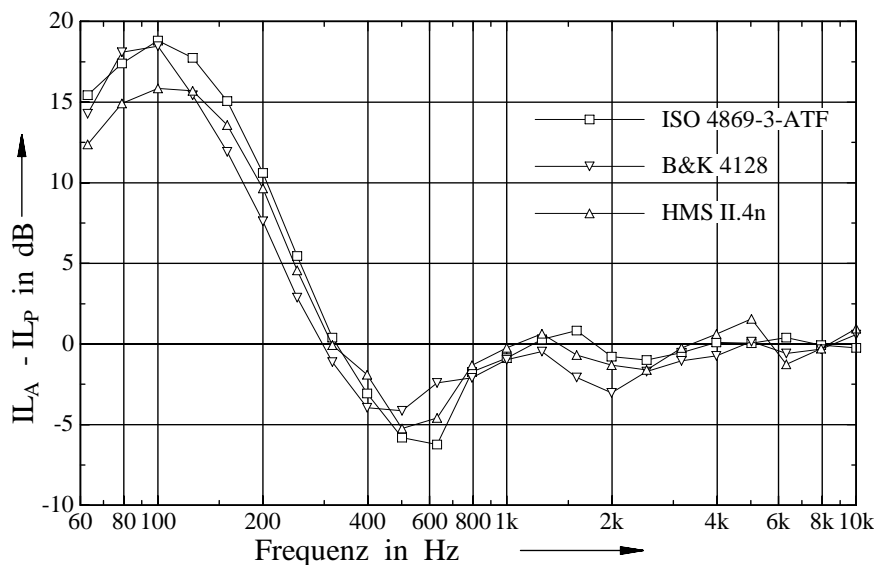


Abbildung 2.6.4: Differenz der Einfügedämmung (Insertion loss) des ANR-Gehörschützers im aktiven Modus (IL_A) und im passiven Modus (IL_P) für alle drei Kopfnachbildungen.

Es zeigt sich deutlich, daß die Wirkung des ANR-Systemes von sämtlichen Kunstköpfen nahezu gleich 'beurteilt' wird, insbesondere wenn man in Betracht zieht, daß die Standardabweichung von Ergebnissen der Schwellenmessung leicht (3...5) dB und mehr erreicht.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlußfolgerungen für die Messung der Schalldämmung von Kapselgehörschützern mit ANR-Systemen ableiten:

Für eine möglichst gute Annäherung an die nach der genormten Hörschwellenmethode gemessene Schalldämmung REAT sollte ein die Eigenschaften des natürlichen Kopfes möglichst gut nachbildender Kunstkopf verwendet werden.

Korrekturen hinsichtlich der vom Kunstkopf nicht erfassten Knochenleitung, des Verschlusseffektes und der Maskierung durch physiologisches Rauschen bei der Schwellenmessung sind erforderlich.

Die Messung der Wirkung des ANR-Systemes jedoch scheint auch mit sehr einfachen Kopfnachbildungen ausreichend genau möglich zu sein, so dass hier eine Kombination von Schwellenmethode (für die Schalldämmung im passiven Modus) mit der Messung der ANR-Wirkung die besten Ergebnisse verspricht.

2.7. Lärm-Messtechnik (K. Genuit)

Aus den vorliegenden Erkenntnissen der Geräuschdiagnose und -analyse im industriellen Bereich lässt sich mit Hilfe der binauralen, gehörgerechten Schallfeldanalyse eine bessere Korrelation zwischen objektiven Messdaten und subjektivem Empfinden bei der Untersuchung von lärmbelasteten Arbeitsplätzen vorzugsweise im Schallpegelbereich unter 90 dB(A) erzielen. Es liegen qualitative Erkenntnisse vor, die zur Annahme berechtigen, dass in Abhängigkeit der Geräuschart physiologische Auswirkungen bei Arbeitnehmern auftreten können, obwohl der bislang gesetzlich zulässige äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} von 85 dB(A) nicht überschritten wird. Offenbar ist die messtechnische, objektive Erfassung von Lärm, z.B. in Form des A-bewerteten Schalldruckpegels, des Terzspektrums und des äquivalenten Schalldruckpegels, nicht immer ausreichend, um eine Belästigung durch Geräusche zu beschreiben. Für eine gehörgerechte Lärmbewertung ist es nicht mehr erforderlich, die psychoakustischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs zu berücksichtigen, sondern auch die binaurale Signalverarbeitung. In einer komplex zusammengesetzten Geräuschsituation darf die Bestimmung der Lautheit, Rauigkeit, Schärfe, Tonalität usw. nicht auf die Summe der einzelnen Schallsignale angewendet werden, sondern es muss vielmehr zunächst eine Aufteilung des Summensignals wieder in die Einzelschallquellen erfolgen, um dann eine getrennte Betrachtung der psychoakustischen Parameter durchzuführen. Die gehörgerechte Messtechnik soll in diesem Zusammenhang als sinnvolle Ergänzung der bestehenden A-bewerteten Schalldruckpegelmessung angesehen werden mit besonderer Berücksichtigung des Schalldruckpegelbereichs unter 90 dB(A). Aus zahlreichen Untersuchungen ist bekannt, dass bei Schallpegelwerten oberhalb von 85 dB(A) eine Schädigung des menschlichen Hörvermögens nicht mehr auszuschließen ist. Somit wird der Pegelbereich oberhalb 85 dB(A) von der konventionellen Messtechnik mit hinreichender Genauigkeit bestimmt.

Im Rahmen des BMFT-Forschungsprojektes „Entwicklung einer Messtechnik zur physiologischen Bewertung von Lärmeinwirkungen unter Berücksichtigung der psychoakustischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs“ wurde erstmalig der Einsatz der binauralen Mess- und Analysetechnik bei der Beurteilung der Lärmbelastung von Arbeitsplätzen berücksichtigt. Das Projekt führte zu wesentlichen neuen Erkenntnissen für die gehörgerechte Lärmbewertung von Arbeitsplätzen. Mit Hilfe der Kunstkopf-Messtechnologie ist es möglich, Lärmbelastungen an Arbeitsplätzen originalgetreu zu erfassen und wieder zu reproduzieren. Das schafft die Voraussetzung, eine breite Bibliothek von unterschiedlichen Geräuschsituationen zu erzeugen und damit ein Expertenwissen aufzubauen, um Sachverständige, Mitglieder von Gewerbeaufsichtsämtern, TÜV, Berufsgenossenschaften

usw. auf die unterschiedlichen Arten von Lärmbelastungen an Arbeitsplätzen zu schulen, aufmerksam zu machen, zu trainieren und Abhilfeschläge zu diskutieren. Da auch die Rechtsprechung in zunehmendem Maße bei Lärmstreitfragen sich nicht nur nach konventionellen Messverfahren richtet, sondern durchaus auch eine subjektive Beurteilung fordert, ist für die Durchführung derartiger Begutachtungen die Kunstkopf-Messtechnologie ein sinnvolles Hilfsmittel.

Eine deutliche Qualitätssteigerung der gehörrichtigen Signalerfassung stellt die binaurale Messtechnik dar. Ihre Ergebnisse auf dem Sektor der auditiven Wahrnehmung und der akustischen Ästhetik sind überzeugend, die Diskrepanzen zur konventionellen Aufnahmetechnik offenkundig. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob es bei den heutigen technischen Möglichkeiten noch vertretbar ist, die sehr komplexen Abläufe der Schallreizaufnahme durch das menschliche Gehör mit einer relativ einfachen Messapparatur nachzuvollziehen. Durch eine dem menschlichen Gehör angenäherte Erfassung von Schallereignissen könnte sich die Möglichkeit ergeben, die aus dem Schallreiz resultierenden Lärmwirkungen exakter zu analysieren und zu beurteilen. Es bietet doch daher an, die Fortschritte der binauralen Technik auch für eine Verbesserung der Beurteilung von Geräuschmissionen im Arbeits- und Umweltlärmbereich zu nutzen. Mit der wirkungsbezogenen Beurteilung des physikalischen Phänomens Schall lassen sich langfristig betrachtet Verbesserungen der Möglichkeiten der Vorhersage von Lärmwirkungen (Arbeitslärm, Umweltlärm), der Lärmüberwachung, des gezielten Einsatzes von Minderungsmaßnahmen sowie der Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Lärmquellen erreichen.

Die Frage, ob und in welchem Maße diese Verbesserung der Messtechnik auch ihre Auswirkungen auf die physiologischen Lärmreaktionen hat, wurde in mehreren Laborversuchen mit jungen, gesunden, männlichen Probanden geprüft. Es konnte aufgezeigt werden, dass reale Industriegeräusche, die als Kunstkopf-Aufnahme wiedergegeben wurden, zu stärkeren physiologischen Reaktionen führten als die gleichen Geräusche mit konventioneller Aufnahme. Unter der Vorstellung, dass die bessere Wiedergabe der Räumlichkeit den entscheidenden Faktor darstellt, wurde im weiteren die räumliche Verteilung von Schallquellen mit hohem und geringem Informationsgehalt analysiert. Aufgrund der Ergebnisse kann geschlossen werden, dass die räumliche Anordnung von Schallquellen für die physiologische Reaktion um so bedeutender ist, je informationshaltiger die Geräusche sind.

Hieraus können sich erhebliche Konsequenzen für die Lärmbewertung am Arbeitsplatz ergeben, da neue Methoden zur qualitativen und quantitativen Lärmbewertung zu entwickeln und für die Praxis der Lärmbeurteilung am Arbeitsplatz zur Verfügung zu stellen sind. Hiermit verbundene Verbesserungen der Arbeitsplatzsituation können dazu beitragen, Arbeitsqualität und Arbeitssicherheit zu erhöhen. Außerdem lässt sich mit einer gezielteren Geräuschdiagnose die Effizienz von Lärminderungsmaßnahmen steigern.

Die Bestimmung der Lärmbelastung von Arbeitnehmern an Arbeitsplätzen stellt sich aufgrund von durchgeführten Untersuchungen als multidimensionale Aufgabe mit verschiedenen Aspekten dar:

- a) Der physikalische Aspekt: Dieser wurde bislang ausschließlich berücksichtigt. Mit ihm lässt sich sicherstellen, dass eine physikalische Beschädigung des Innenohres vermieden wird.

b) Der psychoakustische Aspekt: Schallaufnahmen mit Hilfe des Kunstkopf-Messsystems und Analysen vergleichbar zum menschlichen Gehör. Es erfolgt eine Gewichtung der einfallenden Schallwellen durch die Filterwirkung des äußeren Ohres und eine Analyse unter Berücksichtigung der spektralen und zeitlichen Strukturen.

c) Der kognitive Aspekt: Er entzieht sich vollkommen der objektiven Messtechnik und kann somit nur durch den beurteilenden Experten zur Berücksichtigung gelangen. Der Informationsgehalt des Schallereignisses, die Bewegung der Schallquelle und auch die persönliche Einstellung des Betroffenen zum Schallereignis beeinflussen die physiologischen Reaktionen und damit die Belastung durch Schall des Betroffenen.

Grundsätzlich ist daher die objektive Bestimmung der Lärmbelastung an Arbeitsplätzen (gleiches gilt für Umwelt-, Nachbarschafts- und Freizeitlärm) nur eingeschränkt möglich. Die Kunstkopf-Messtechnik in Verbindung mit der psychoakustischen Bewertung ist gegenüber der konventionellen Messtechnik ein deutlicher Fortschritt hinsichtlich der objektiven Bestimmung einer Lärmbelastung. Zur adäquaten Gesamtbeurteilung ist jedoch die Einbeziehung von kognitiven Aspekten durch Einbeziehung von Expertenwissen erforderlich.

2.8. SoundScape – Ein Einsatzgebiet für die Kunstkopftechnologie (K. Genuit)

Die Psychoakustik befasst sich mit der Schallwahrnehmung des menschlichen Gehörs, sie umfasst die gehörrichtige Aufnahme mit einem Kunstkopf-Messsystem und der gehörgerechten Analyse von Schallereignissen. Unter Berücksichtigung des kognitiven Aspekts von Geräuschen ermöglicht die Psychoakustik die Beschreibung der Transformation von einem Schallereignis in ein Hörereignis. Die praktischen Hauptanwendungen der Erkenntnisse aus der Psychoakustik liegen seit vielen Jahren im Bereich der Automobilindustrie und dort vornehmlich bei der Analyse der Fahrzeuginnenraumakustik. Von daher liegen aus diesem Bereich zahlreiche praktische Erfahrungen vor, wie Geräusche von Motor, Reifen, Wind und diversen Hilfsaggregaten psychoakustisch zu analysieren sind. Von mindestens gleichwertiger Bedeutung sind jedoch Untersuchungen von Umwelt- und Arbeitsplatzgeräuschen unter psychoakustischen Gesichtspunkten. Lärm kann nicht nur direkt schädlich für das menschliche Gehör sein aufgrund der Schallenergie, sondern in den meisten Fällen auch indirekt durch bestimmte zeitliche Strukturen und spektrale Verteilungen eine Lästigkeit ausüben, die sich ohne Kenntnisse der Psychoakustik in Verbindung mit dem kognitiven Kontext nicht beantworten lässt.

Beim SoundScape besteht die Aufgabe, die gesamten Auswirkungen von Geräuschen – natürliche und vom Menschen direkt oder indirekt erzeugte- im Kontext der Befindlichkeiten der in diesem SoundScape lebenden Menschen zu betrachten. Eine wichtige Aufgabe dabei liegt in der messtechnischen Beschreibung der im SoundScape befindlichen Schallereignisse. Die Beeinträchtigung der Lebensqualität durch die akustische Umwelt lässt sich bekanntlich nicht alleine mit Hilfe des A-bewerteten Schalldruckpegels erfassen. Aufgrund der komplexen Signalverarbeitung im menschlichen Gehör sind komplexere Analyseverfahren mindestens erforderlich wie sie von der Psychoakustik in Form von Berechnungsgrößen wie Lautheit, Schärfe, Rauigkeit usw. zur Verfügung gestellt wird.

Menschen leben in einer Geräuschlandschaft, die sich aus natürlichen Umweltgeräuschen und aus technisch erzeugten Geräuschen zusammensetzt. Hinsichtlich einer Umweltbelastung fühlen sich immer mehr Menschen durch Geräusche zu stark belastet. Daher stellt sich die Frage, wie kann diese Geräuschbelastung durch die akustische Umwelt richtig erfasst und

beschrieben werden, so dass die daraus resultierenden Aussagen sehr gut widerspiegeln, was die betroffenen Menschen empfinden und beschreiben. Diese Betrachtungsweise kann nicht eindimensional erfolgen. Neben dem physikalischen Aspekt eines Schallereignisses existieren die psychoakustischen Eigenschaften des Gehörs sowie die psychologischen Komponenten der Betroffenen, die allesamt zu berücksichtigen sind.

2.8.1 Was ist Lärm?

Nach DIN 1320 wird Lärm als Hörschall definiert, der die Stille oder eine gewollte Schallaufnahme stört oder zu Belästigung führt. Damit ist eigentlich eindeutig festgelegt worden, dass die Bestimmung von Lärm nicht ohne weiteres auf einfach zu bestimmende objektive Parameter, wie dem A-bewerteten Schalldruckpegel oder dem äquivalenten Dauerschallpegel zurückzuführen ist. Nach DIN 1320 ist demnach ein Schallereignis erst dann als Lärm zu bezeichnen, wenn es stört oder zu Belästigung führt. Die Frage, ob Schall als Lärm empfunden wird, kann demnach erst nach durchgeführter Transformation vom Schallereignis in ein Hörereignis erfolgen. Diese Abbildung bzw. diese Transformation von Schallereignissen in Hörereignisse ist aber individuell unterschiedlich und hängt von vielen Parametern ab, die sich der messtechnischen quantifizierbaren Bestimmung entziehen.

Die Messung von akustischen Schallereignissen erfolgt üblicherweise in Form des A-bewerteten Schalldruckpegels. Auf dieses Messverfahren hat sich nach dem 2. Weltkrieg die ISO (International Standardization Organisation) geeinigt, um ein "Messwirrwarr" in unterschiedlichen Ländern zu vermeiden und somit ein einfaches Messverfahren international festzulegen, wobei durch die A-Bewertung ein erster Ansatz unternommen wurde, die frequenzabhängige Pegelbewertung durch das menschliche Gehör zu berücksichtigen. In ihrem letzten Umweltgutachten [Rat (1987)] von 1987 für die Deutsche Bundesregierung weisen die Gutachter jedoch schon darauf hin, dass die ISO seinerzeit die A-bewertete Schalldruckpegelmessung in dem vollen Bewusstsein standardisiert hat, nicht in jeder Hinsicht der gehörgerechten Schallfeldanalyse gerecht zu werden. Seinerzeit war der Stand der Technik weder technologisch noch vom wissenschaftlichen Hintergrund soweit, eine Schallmesstechnik zu standardisieren, die in jeder Hinsicht einer Schallfeldanalyse durch das menschliche Gehör vergleichbar wäre.

2.8.2 Beurteilung von Lärm

Die Beurteilung von Lärm hängt ab von den physikalischen Eigenschaften des Schallereignisses, den psychoakustischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs sowie den psychologischen Aspekten des Menschen. Die Berücksichtigung der psychoakustischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs bei der Beurteilung von Lärm führt schon zu erheblich besser differenzierten Aussagenmöglichkeiten als lediglich die einfache Betrachtung durch den A-bewerteten Schalldruckpegel. Die Lautheit berücksichtigt zum Beispiel unter anderem die spektrale Verteilung im Gegensatz zur A-bewerteten Schalldruckpegelmessung. Es ist durchaus denkbar, dass Geräusche mit gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel als unterschiedlich laut empfunden werden. Mit der Schärfe ist ein weiteres wichtiges Maß für die Belästigung durch Lärm in der Psychoakustik festgelegt worden. Sie beschreibt das Verhältnis von höherfrequenten Schallanteilen zur Gesamtlautheit. Mit Hilfe der Schwankungsstärke und der Rauigkeit werden Modulationen im Schallereignis beschrieben, die je nach Ausprägung auch einen deutlichen Beitrag zur Lärmbelästigung leisten. Mit Schärfe, Schwankungsstärke und Rauigkeit werden letztendlich bestimmte Muster im Schallereignis beschrieben. Diese Muster sind weitestgehend pegelunabhängig, d.h. eine Reduzierung des Pegels bei unveränderten stö-

renden Mustern im Schallereignis führt zu nahezu unveränderter Belästigung durch das Geräusch.

2.8.3 SoundScape

Unter SoundScape ist die komplexe Überlagerung von natürlichen und technischen Geräuschen zu verstehen entsprechend Abbildung 2.8.1. Bei der Beurteilung der Geräuschqualität oder der Belästigung durch Lärm ist es wichtig zu wissen, welche Eigenschaften des SoundScapes in welcher Art und Weise auf den Menschen wirken. Das menschliche Gehör ist bekanntlich in der Lage, aufgrund des beidohrigen Hörens und dem damit verbundenen Richtungshören und der Selektion von Einzelschallereignissen eine komplexe Geräuschlandschaft in einzelne Hörereignisse zu unterteilen. D.h. es ist nicht unbedingt anzunehmen, dass die Summe aller Schallereignisse nicht alleine ausschlaggebend ist für die Belästigung durch ein Schallereignis. Es ist durchaus denkbar, dass einzelne Beiträge des SoundScapes herausselektiert werden und die individuelle Beurteilung maßgeblich beeinflussen. Wenn also in einem bestehenden SoundScape die davon betroffenen Menschen über eine Lärmbelästigung klagen, muss zunächst herausgefunden werden, was die eigentlichen Ursachen für diese Lärmbelästigungen sind:

- Ist es die zeitliche Struktur?
- Sind es die informativen Eigenschaften des Geräusches?
- Liegt es an der Einstellung der Betroffenen zu den Geräuschverursachern?
- Ist das Geräusch aufgrund von Modulation oder auffälligen Mustern im Zeit- oder Frequenzbereich unangenehm und auffällig?
- Welche der vorhandenen Geräuschquellen verursacht die Lärmbelästigung?

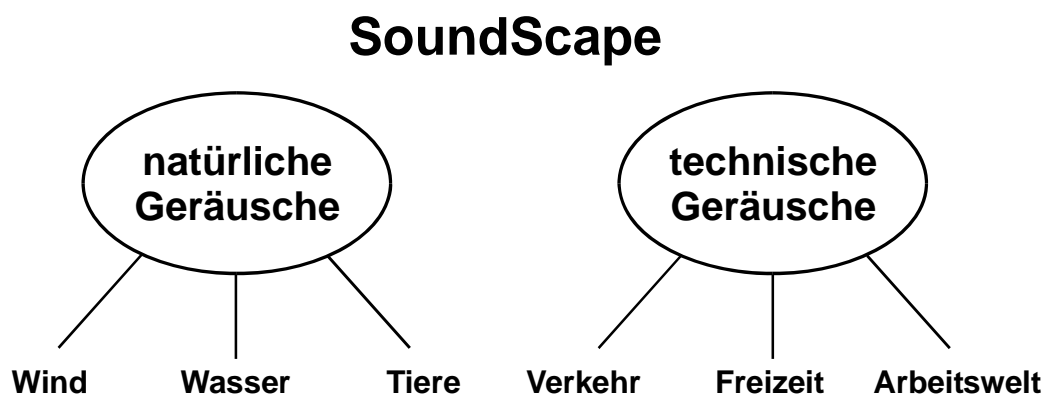


Abbildung 2.8.1: Schematische Darstellung SoundScape

Erst wenn genau feststeht, wodurch die Lärmbelästigung in einem SoundScape hervorgerufen wird, kann eine weitere Analyse erst sinnvoll durchgeführt werden, um ggf. Änderungen herbeizuführen. Änderungen an einem SoundScape können nicht nur dadurch bewerkstelligt werden, dass evtl. Geräuschquellen mit unangenehmen Eigenschaften reduziert oder eliminiert werden, es ist durchaus denkbar, durch Hinzufügen einzelner Geräuschquellen mit hoher Akzeptanz hinsichtlich der Geräuschqualität andere Geräuschquellen mit geringerer Akzeptanz zu maskieren. Andersherum ausgedrückt, wenn eine Lärmbelästigung innerhalb eines SoundScapes vorliegt, ist es nicht angebracht, als erstes mit Hilfe vom A-bewertete Schalldruckpegel oder der äquivalenten Dauerschallpegelmessung den Nachweis zu erbringen, dass keine Lärmbelästigung vorliegen kann. Hierin liegt ein großes Missverständnis bei der

gehörrechtlichen Beurteilung von Schallereignissen. Während die Gefahren durch Lärm hinsichtlich einer Gehörschädigung durchaus geeignet mit dem A-bewerteten Schalldruckpegel beschreibbar sind, ist eine einfache Übertragung auf die Frage hinsichtlich der Lärmbelastigung nicht ohne weiteres gegeben. Bei der Entwicklung einer Messtechnik zur physiologischen Bewertung von Lärmwirkung unter Berücksichtigung der psychoakustischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs [Genuit (1997)] wurde erstmals mit spezieller Berücksichtigung von Arbeitsplätzen versucht, die neueren Erkenntnisse der gehörgerechten Schallanalyse basierend auf der Kunstkopf-Messtechnologie und den psychoakustischen Analysemethoden auf Arbeitsplatzlärm anzuwenden. Diese gehörgerechte Schallaufnahme und Analyseverfahren finden seit vielen Jahren im Automobilbereich und dort speziell für die Fahrzeuginnengeräuschqualität Anwendung [Genuit (1988, 1996)]. Bei den Untersuchungen von lärmbelasteten Arbeitsplätzen wurden grundsätzlich nur solche ausgewählt, die einen A-bewerteten Schalldruckpegel aufwiesen, die deutlich unterhalb 85 dB(A) lagen und somit eine gehörschädigende Wirkung von Lärm auszuschließen war. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden zahlreiche neue Erkenntnisse zur Lärmbeurteilung und -bewertung festgestellt, unter anderem auch, dass alleine die räumliche Verteilung von verschiedenen Schallquellen und deren Zuordnung zueinander oder sogar deren Bewegung signifikante physiologische Auswirkungen auf die Testpersonen ausübten. Daraus leitet sich ab – wie in Abbildung 2 dargestellt – dass die Beschreibung der Geräuschqualität deutlich umfassender bzw. mehrdimensional ist und der A-bewertete Schalldruckpegel sicher kein falsches, aber auch auf keinen Fall ein hinreichendes Messverfahren darstellt, die subjektiv empfundene Belästigung durch Lärm adäquat zu beschreiben.

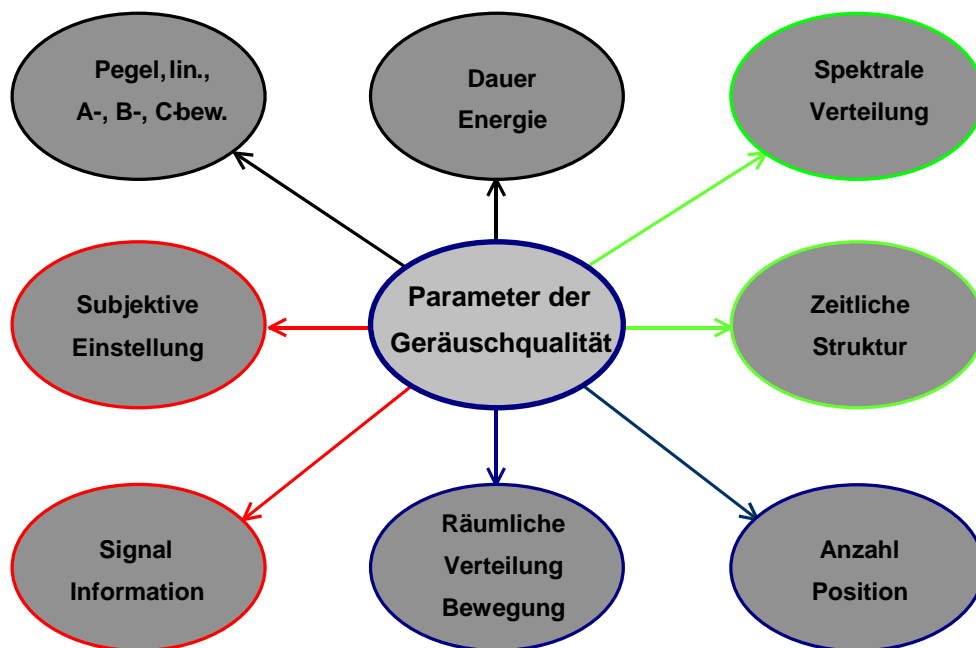


Abbildung 2.8.2: Einflussparameter für die Geräuschqualität

Je kleiner der A-bewertete Schalldruckpegel eines Schallereignisses ausfällt oder auch je geringer die Lautheit ist, desto wichtiger werden für die Beurteilung der Geräuschqualität oder auch der subjektiv empfundenen Belästigung durch Lärm Muster im Zeit- und Frequenzbereich des Schallereignisses. Veränderungen werden im Zeit- und Frequenzbereich im weiten Bereich ohne Berücksichtigung des absoluten Pegels als Muster wahrgenommen und zur Beurteilung einer Geräuschsituation herangezogen.

2.8.3 Zusammenfassung

Die Betrachtung von SoundScape hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den Menschen wird immer wichtiger. Da das menschliche Gehör immer aktiv ist und nicht einfach - wie beim Auge – abgeschaltet werden kann, ist der Mensch den Geräuschen quasi ausgeliefert. Während im Hochpegelbereich der Zusammenhang zwischen Gehörschädigung und dem A-bewerteten Schalldruckpegel noch relativ einfach und sicher dargestellt werden kann, ist die allgemeine Transformation von Schallereignissen in Hörereignisse innerhalb eines SoundScapes und den damit verbundenen Möglichkeiten einer Lärmbelästigung erheblich komplexer und bedarf einer stärkeren interdisziplinären Zusammenarbeit verschiedener Fachrichtungen wie Akustiker, Psychoakustiker, Mediziner, Soziologen und Psychologen. Die Erweiterung der traditionellen Messtechnik mit einem Messmikrofon um die zusätzlichen Aspekte einer gehörgerechten Schallmesstechnik bedeutet nicht automatisch auch eine Erhöhung der Kosten für Lärminderungsmaßnahmen oder Geräuschreduzierungsvorhaben. Im Gegenteil, dadurch, dass gezielt Geräuschanteile erkannt werden, die für einen unangenehmen Geräuscheindruck oder die Belästigung durch Lärm verantwortlich sind, können häufig aufwendige, breitbandige Schallminderungsmaßnahmen vermieden werden. Eine breitbandige Reduzierung eines Geräusches z.B. um 3 dB kann je nach Umstand verhältnismäßig kostenaufwendig sein. Weist das Schallereignis jedoch auffallende Merkmale auf z.B. Modulationen, die eine Rauigkeit hervorrufen, so wird eine solche Geräuschsituation als unverändert lästig beurteilt nach einer durchgeführten Reduzierung des Gesamtschallereignisses um 3 dB. Die gehörgerechte Schallanalyse erlaubt nun gezielte Maßnahmen, indem z.B. durch andere räumliche Anordnungen, durch Verschiebung einzelner Spektralkomponente in andere Spektralbereiche, wo sie durch angenehme Geräusche maskiert werden oder durch gezielte Manipulation von Teilgeräuschkomponenten, häufig eine erheblich kostengünstigere Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Geräuschqualität. Es geht in Zukunft immer häufiger nicht nur darum, Schall in seiner Entstehung und Ausbreitung zu mindern, sondern auch ein angenehmes Geräuschdesign zu entwickeln.

3. Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit

3.1. Unsicherheit der mit Kunstköpfen ermittelten Meßdaten

3.1.1 Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Übertragungsfunktion im Freifeld (Horizontalebene) (T. Fedtke)

Zur Einschätzung der Vergleichbarkeit der mit verschiedenen Kunstkopf-Systemen ermittelten Ergebnisse ist die Kenntnis ihrer Übertragungseigenschaften erforderlich. Am Beispiel fünf allgemein verfügbarer Kunstkopf-Messsysteme, im folgenden als System (A...E) bezeichnet, werden Unterschiede in der Übertragungsfunktion und der Richtcharakteristik in der Horizontalebene diskutiert.

Alle Systeme sind für die Messung ohrferner Schallquellen konstruiert, d.h. sie besitzen keine Nachbildung der Trommelfell-Impedanz. Zwei Systeme (C, D) bilden die Schulter nach, während die Systeme B und E eine komplette Torso-Simulation aufweisen und System A nur den Kopf modelliert. System C verfügt über geometrisch vereinfachte Pinna-Nachbildungen, während alle anderen anatomisch geformte Pinnae besitzen.

Die Messung der Übertragungsfunktion erfolgte in einem reflexionsarmen Raum mit einem Maximalfolgen-Messsystem. In Verbindung mit einer Signal-Nachbearbeitung (Beseitigung des Einflusses störender Reflexionen der Kunstkopf-Befestigung) waren bis ungefähr 200 Hz ausreichende Freifeldbedingungen gegeben. Als Schallquelle wurde eine koaxiale Anordnung von Hochtöner und Mitteltieftöner verwendet. Um in der geforderten 1/12-Oktav-Auflösung am Meßort (Referenzpunkt in 2 m Entfernung vom Lautsprecher) eine genügende Homogenität des Schallfeldes zu erzielen, wurden Messungen in zwei getrennten Frequenzbereichen (Trennfrequenz 5 kHz) mit verschiedenen, speziell angepaßten Lautsprecherkonfigurationen durchgeführt. Zum Test der Feldbedingungen im für die Kunstkopfmessung vor allem wichtigen räumlichen Bereich um den Referenzpunkt wurden mit einem 1/2-Zoll-Freifeld-Mikrofon (Typ Brüel&Kjaer 4165) die Schalldruckpegeldifferenzen in einem Abstand von jeweils 15 cm nach oben, unten, rechts und links zum Referenzpunkt gemessen. In Abbildung 3.1.1.1 sind die Pegeldifferenzen über der Frequenz im Bereich von 100 Hz bis 16 kHz dargestellt. Ihr absolutes Maximum beträgt nur 1,1 dB bei 1 kHz für die Richtung "unten". Insbesondere in den für die Messung der Richtcharakteristik in der Horizontalebene wichtigen Richtungen "rechts" und "links" ist die Abweichung insgesamt nicht größer als + 0,5/ - 0,8 dB.

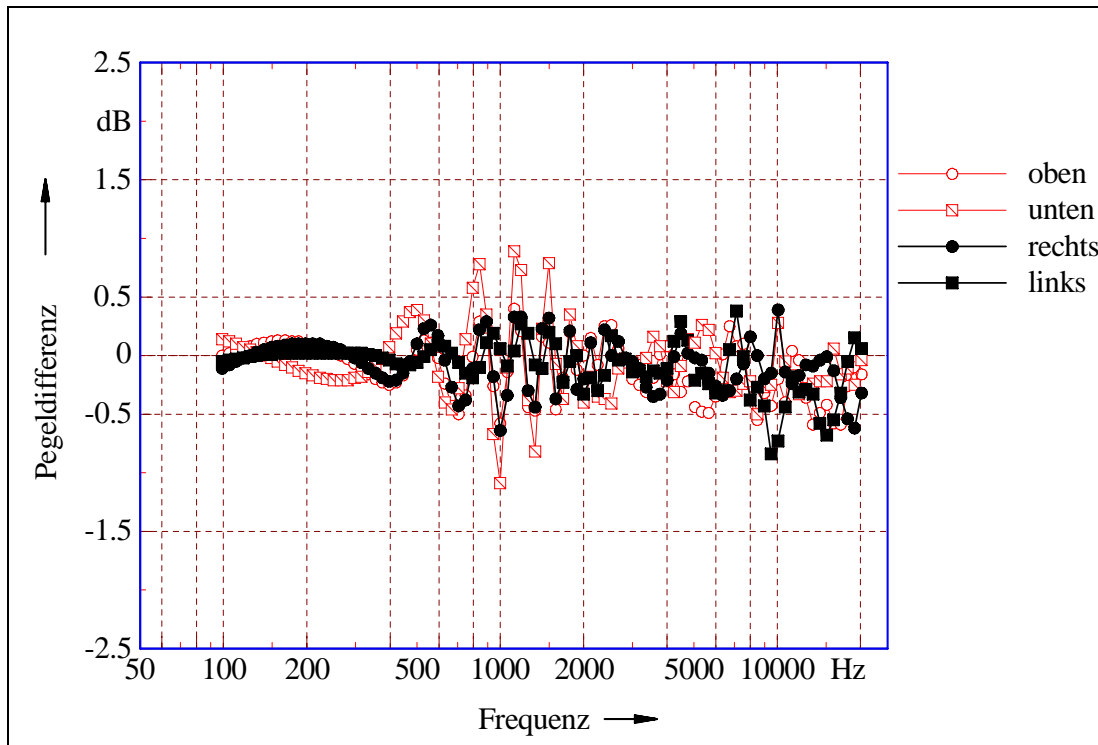


Abbildung 3.1.1.1: Pegelabweichungen im freien Schallfeld bei Mikrofonpositionen 15 cm vom Referenzpunkt entfernt.

Die Bestimmung der Freifeld-Übertragungsfunktion erfolgte im Frequenzbereich von 200 Hz bis 16 kHz durch Vergleich der Übertragungsfunktion des jeweiligen Kunstkopfes mit der eines kalibrierten 1/2-Zoll-Freifeldmikrofones im oben beschriebenen Schallfeld. Sowohl das Mikrofon als auch der Kunstkopf wurden mittels eines Pistonphons Typ Brüel&Kjaer 4220 bei 250 Hz kalibriert. Dann wurden die spektralen Schalldruckpegel bei gleichem Anregungssignal einmal mit dem Freifeldmikrofon (in Abwesenheit des Kunstkopfes) und einmal mit dem Kunstkopf selbst gemessen. Anschließend wurde die Abweichung des Freifeldmikrofones vom linearen Idealfall rechnerisch korrigiert, womit man die Freifeld-Übertragungsfunktion des jeweiligen Kunstkopfes, definitionsgemäß auf das Schallfeld in Abwesenheit des Kopfes bezogen, erhält. Dabei erfolgte die Positionierung des Mikrophones und des Kunstkopfes mit im Laborbetrieb üblichen Mitteln (Längenmaßstab, Markierungen), insbesondere wurde keine "akustische" Ausrichtung des Kunstkopfes mit Hinblick auf die 0°-Einstellung vorgenommen. Damit sollten praktische Meßbedingungen weitgehend eingehalten werden. Um ein Maß für den unsystematischen Fehler dieser Messung zu erhalten, wurde mit einem Kunstkopf die komplette Bestimmung der frequenzabhängigen Freifeld-Übertragungsfunktion sechs Mal wiederholt und aus der Standardabweichung s die Wiederholbarkeit $r = 2 * \sqrt{2} * s$ berechnet [DIN ISO 5725 (1981)].

Im gesamten betrachteten Frequenzbereich werden 0,8 dB nicht überschritten, wie Abbildung 3.1.1.1 zeigt.

Die auf diese Weise ermittelten Freifeld-Übertragungsmaße der untersuchten Systeme sind in Abbildung 3.1.1.2 dargestellt.

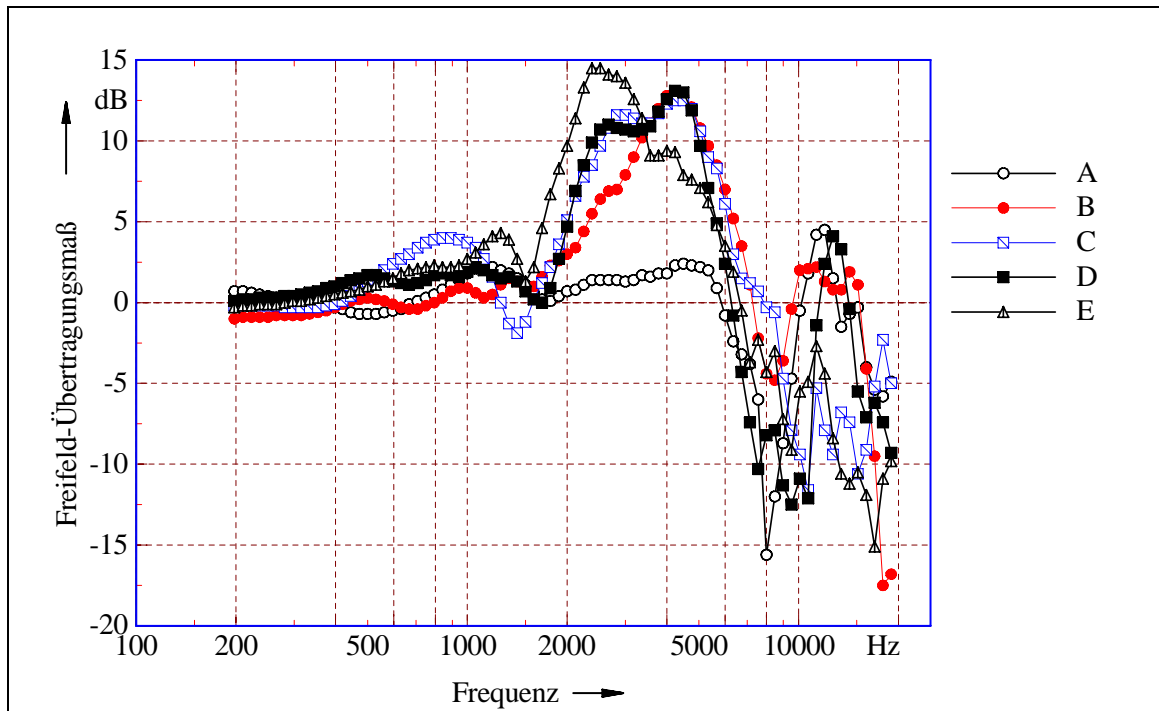


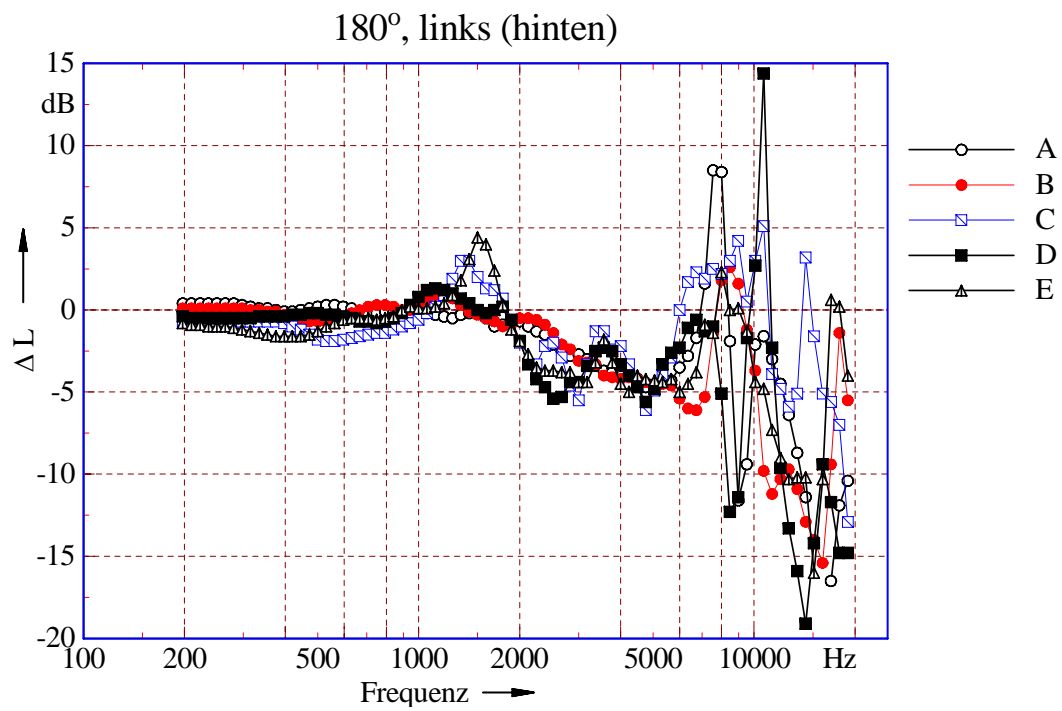
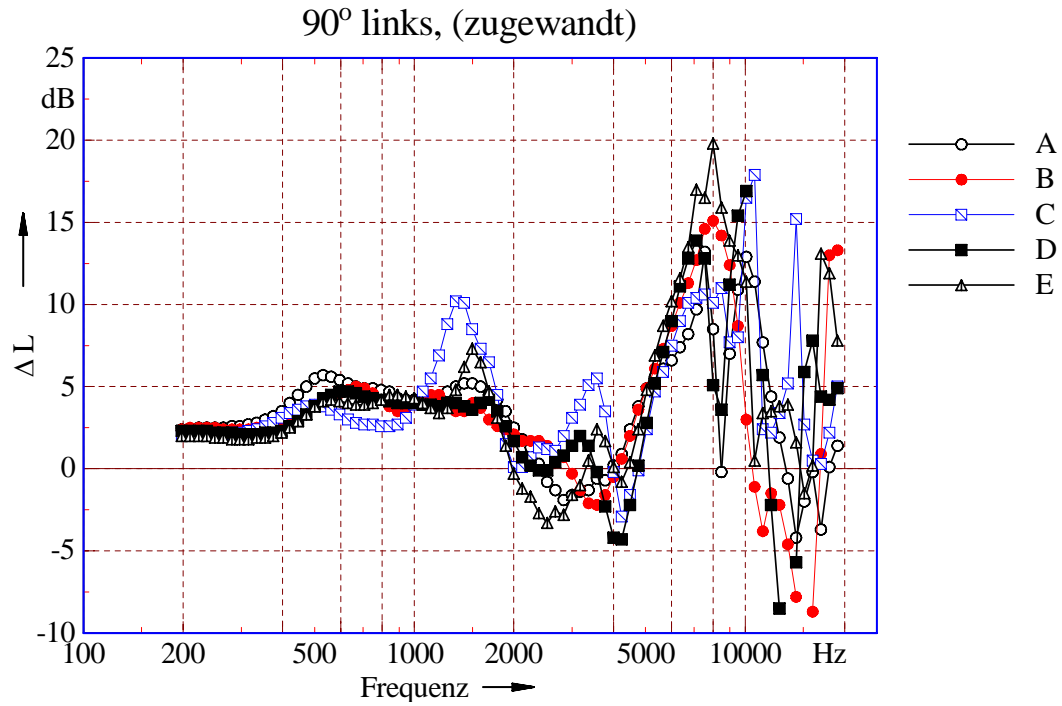
Abbildung 3.1.1.2: Freifeld-Übertragungsmaße für die Kunstkopf-Systeme A...E

Es zeigte sich bis ungefähr 8 kHz eine gute Übereinstimmung der Systeme B...E, abgesehen von der etwas nach tieferen Frequenzen verschobenen Resonanzüberhöhung des Systems E. Zum System A ist anzumerken, daß sich auf Grund der vorgesehenen festen Diffusfeld-Entzerrung kein vergleichbarer Frequenzgang der Übertragungsfunktion ergibt. Bei höheren Frequenzen streuen die Frequenzgänge allerdings stärker.

Für die Messung der Richtcharakteristik in der Horizontalebene wurden die Kunstköpfe auf einen Drehteller Typ Brüel&Kjaer 3922 montiert und vor der festen Schallquelle um eine vom jeweiligen Hersteller vorgegebene Achse gedreht. Im oben beschriebenen Schallfeld wurden die Übertragungsfunktionen der Kunstköpfe in 15°-Schritten in der Horizontalebene gemessen und anschließend auf die Übertragungsfunktion bei 0° bezogen. In Abbildung 3.1.1.3 sind exemplarisch die Richtcharakteristika für das linke Ohr und die Winkel 90° (Ohr ist zugewandt), 180° (Beschallung von hinten) und 270° (Ohr ist abgewandt) für alle untersuchten Systeme dargestellt.

Im Frequenzbereich unterhalb von 8 kHz ist eine gute strukturelle Übereinstimmung des Kurvenverlaufes festzustellen. Dabei zeigen die Systeme C und E eine isolierte Überhöhung in der Umgebung von 1500 Hz. Bei höheren Frequenzen treten in einzelnen Frequenzbändern Unterschiede zwischen den Köpfen in der Größenordnung von 10 dB auf, während der generelle Verlauf der Kurven auch hier ähnlich erscheint.

Damit bestätigen sich prinzipiell die Ergebnisse der Untersuchungen von Genuit et al. [Genuit (1996b)], bei denen allerdings die Richtcharakteristika in unterschiedlichen Laboratorien gemessen wurden und nur in Terz-Auflösung vorlagen, so daß ein quantitativer Vergleich nicht unmittelbar möglich ist.



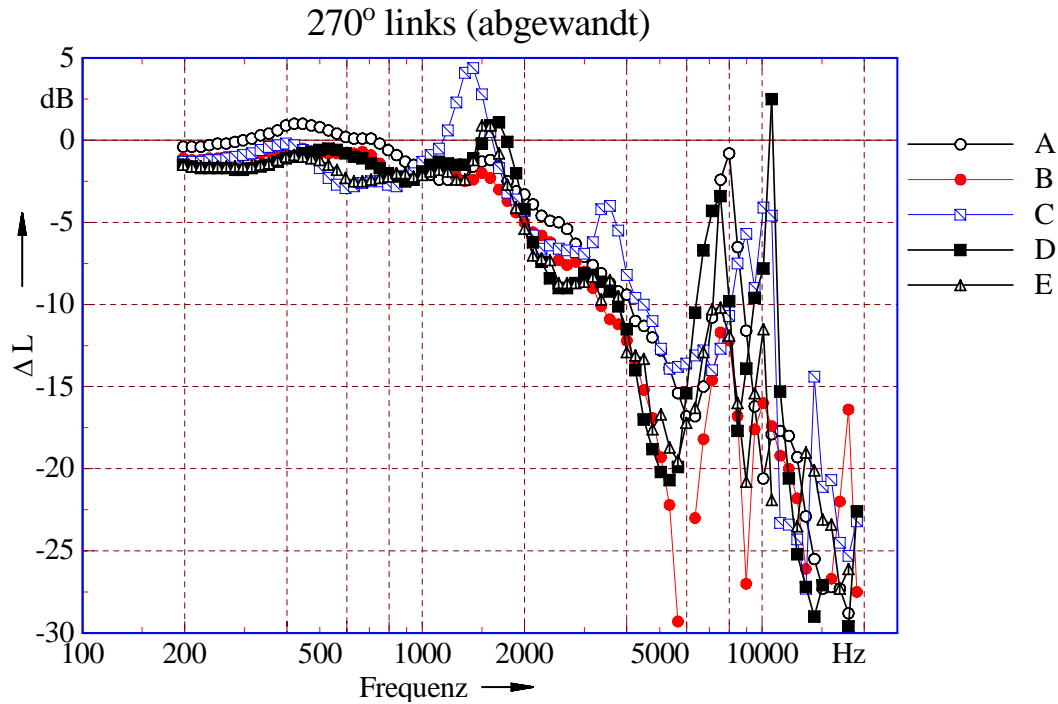


Abbildung 3.1.1.3: Richtcharakteristika in der Horizontalebene des freien Schallfeldes für die Kunstkopf-Systeme A...E, linkes Ohr

Betrachtet man die Standardabweichung als Maß für die Streuung der Richtcharakteristika der fünf untersuchten Systeme in 1/12-Oktav-Frequenzbändern, so kann man für die drei ausgewählten Richtungen bis 5 kHz Werte kleiner als 6 dB, in einzelnen höheren Frequenzbändern allerdings auch Werte um 12 dB feststellen. Im Vergleich mit der Streuung der Außenohr-Übertragungsfunktion des Menschen stellt das einen relativ geringen Wert dar (siehe Abbildung 3.1.1.4).

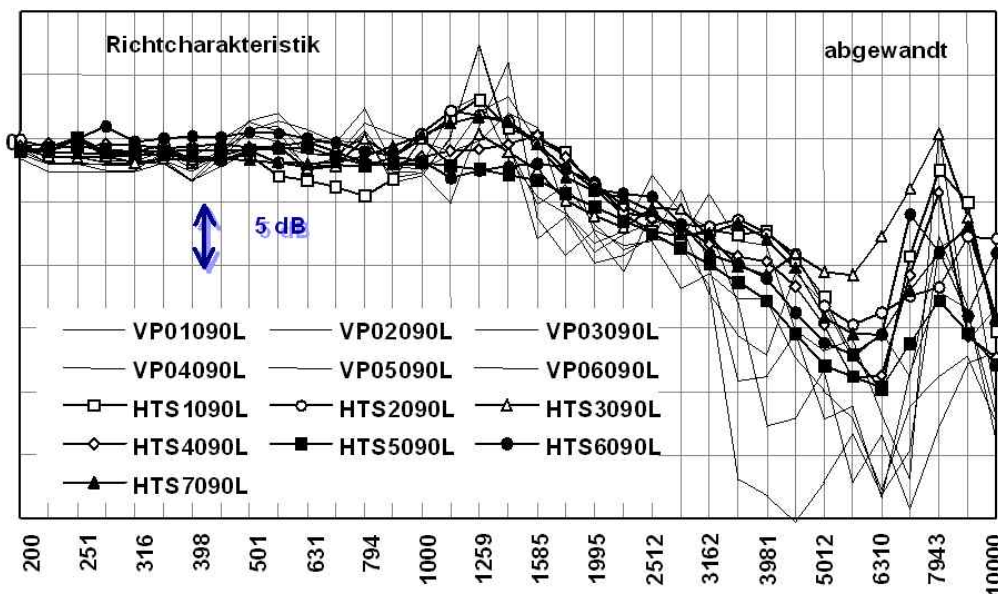


Abbildung 3.1.1.4: Streuung der Außenohr-Übertragungsfunktion an Versuchspersonen (VPN) und an Kunstköpfen (HTS). Abbildung aus [Genuit (1996b)]

3.1.2. Bestimmung der Freifeld-Diffusfeld-Transformation von Kunstköpfen (A. Schmitz)

3.1.2.1 Einleitung

Das freie und das diffuse Schallfeld werden im allgemeinen für bestimmte Zwecke als Bezugsschallfelder benutzt. So werden z.B. Hörschwellen im freien und diffusen Schallfeld bestimmt, aber auch binaurale Aufnahmen auf ein definiertes Schallfeld bezogen, um später bei der Wiedergabe eine entsprechend angepasste Entzerrung des Wiedergabesystems (z.B. Kopfhörer) an die Aufnahme vornehmen zu können.

Für beide Schallfelder sind die Übertragungsmaße von Versuchspersonen in der Vergangenheit öfter bestimmt worden (siehe [Vorländer (1991)]). Insbesondere lassen sich aus solchen Daten die Unterschiedsfunktionen ableiten, die eine Umrechnung der im freien Schallfeld gewonnenen Übertragungsmaße in die des Diffusfeldes bzw. umgekehrt ermöglichen. Solche Freifeld-Diffusfeld-Transformationskurven ($G_{FF}-G_{DF}$) lassen sich je nach Anwendung aus objektiven Messungen und auch aus subjektiven Tests (z.B. Hörschwellenbestimmung) ermitteln.

Werden bei den objektiven Messungen statt Versuchspersonen Kunstköpfe eingesetzt, so müssen deren Übertragungsmaße für das freie und diffuse Schallfeld denen natürlicher Versuchspersonen gleichen.

Vorländer führte 1991 Messungen von Kunstköpfen im freien und im künstlichen diffusen Schallfeld durch und bestimmte daraus u.a. die Freifeld-Diffusfeld-Transformationskurve. Diese Transformationskurven verglich er mit denen natürlicher Versuchspersonen, wobei er deren Diffusfeld-Übertragungsmaß aus einer Mittelung über viele Freifeld-Übertragungsmaße verschiedener Richtungen gewann.

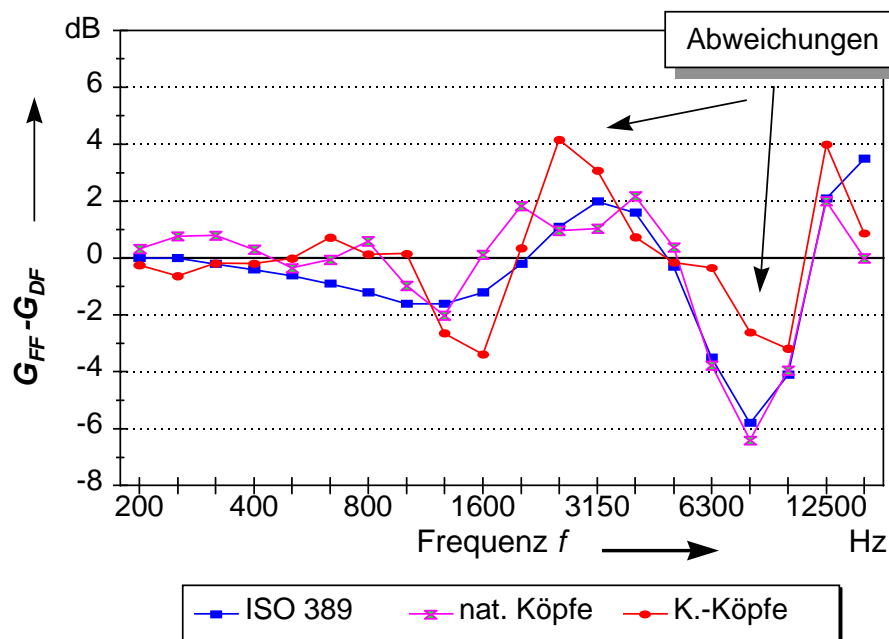


Abb. 3.1.2.1: Transformationskurven von natürlichen Köpfen, drei Kunstköpfen und nach ISO 389 (Daten aus [Vorländer (1991)] u. [Schmitz (1990)])

Abb.3.1.2.1 zeigt die Transformationskurve nach ISO 389-7, die mittlere Transformationskurve aus Daten von Vorländer und Shaw sowie die entsprechende mittlere Kurve für die drei Kunstköpfe B&K 4128, HMS II und Kemar.

Augenfällig ist hier die signifikante und systematische Abweichung der Ergebnisse der Kunstkopfmessungen im Bereich um 3 kHz und <10 kHz von den Kurven natürlicher Köpfe und der Kurve nach ISO 389-7. Solche Abweichungen müssten sich, sofern sie sich reproduzierbar messen lassen, auch in einer zu natürlichen Köpfen abweichenden Geometrie des Beugungskörpers Kunstkopf niederschlagen. Da die Kunstköpfe ihrem Anspruch nach aber eine typische natürliche Kopfgeometrie nachbilden (vgl. ITU P.58), ist dies zunächst nicht zu erwarten. Als weitere Ursache für die Abweichungen ist hier möglicherweise das künstliche diffuse Schallfeld anzusehen, das mit seiner tetraederförmigen Aufstellung der Lautsprecher kein dem Schallfeld des Hallraumes vergleichbares Diffusfeld erzeugt.

Im Rahmen von vergleichenden Messungen an Kunstköpfen wurden in der PTB die Freifeld- und Diffusfeld-Übertragungsmaße von 5 verschiedenen Kunstköpfen gemessen (siehe auch [Fedtke (1998)]). Die dort erhaltene Datenbasis machte es möglich auch neuere Daten über objektiv gemessene Transformationskurven zu gewinnen und damit eine Bestätigung oder Klärung der systematischen Abweichungen bei den Untersuchungen von Vorländer zu finden.

3.1.2.2 Bestimmung der Übertragungsmaße

Bei den untersuchten Kunstköpfen handelt es sich um die Typen: B&K 4100, Cortex MK1, Neumann KU 100, Head Acoustics HMS III.0, ITA Aachen 2. Prototyp. Die Bestimmung der Freifeld-Übertragungsmaße ist ausführlich bei Fedtke [Fedtke (1998)] beschrieben und wird daher hier nicht weiter erläutert. Das Diffusfeld-Übertragungsmaß wurde im schiefwinkligen Hallraum der PTB bestimmt. Hierbei wurde für vier Lautsprecher- und drei Kopfpositionen sowie für jede Kopfposition für drei verschiedene horizontale Drehwinkel die Diffusfeld-Übertragungsfunktion ermittelt. An jeder Kopfposition wurde für die vier Lautsprecherpositionen je eine Referenzmessung mit einem Mikrofon durchgeführt, dessen Diffusfeld-Übertragungsmaß genau bekannt ist. Die Messwerte der Kunstköpfe wurden für jede Messposition auf die entsprechende Referenzmessung bezogen, um den nicht idealen frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen des diffusen Feldes herauszurechnen. Die insgesamt 36 Diffusfeld-Kurven je Kunstkopf wurden dann zunächst energetisch zu einer Übertragungsfunktion gemittelt und anschließend in 1/12 bzw. 1/3 Oktavbreite ausgewertet.

3.1.2.3 Diffusfeld-Übertragungsmaße

Keiner der untersuchten Kunstköpfe besitzt einen Ohrsimulator zur Nachbildung des Ohrkanals und der Trommelfellimpedanz, da sie nicht zur Aufnahme ohrnaher Schallquellen oder zur Messung von Gehörschützern, sondern zur Schallaufzeichnung von „Fernfeldereignissen“ konzipiert wurden. Die Diffusfeld-Übertragungsmaße konnten daher nicht absolut ermittelt werden, sondern wurden, sofern möglich, direkt mit der zugehörigen Entzerrung gemessen. Dabei konnte für die Köpfe MK1, HMS III.0 und ITA eine Diffusfeldentzerrung direkt eingestellt werden, während der KU 100 ohne zusätzliche Einstellmöglichkeit bereits als diffusfeldentzerrt gilt. Lediglich der B&K 4100 besaß keine Diffusfeldentzerrung. Abb.3.1.2.2 zeigt die Diffusfeld-Übertragungsmaße der vier Kunstköpfe, die mit entsprechender Diffusfeldentzerrung gemessen wurden. Aus den Meßdaten ist direkt die Güte der Entzerrung als Abweichung von der 0 dB Linie ablesbar.

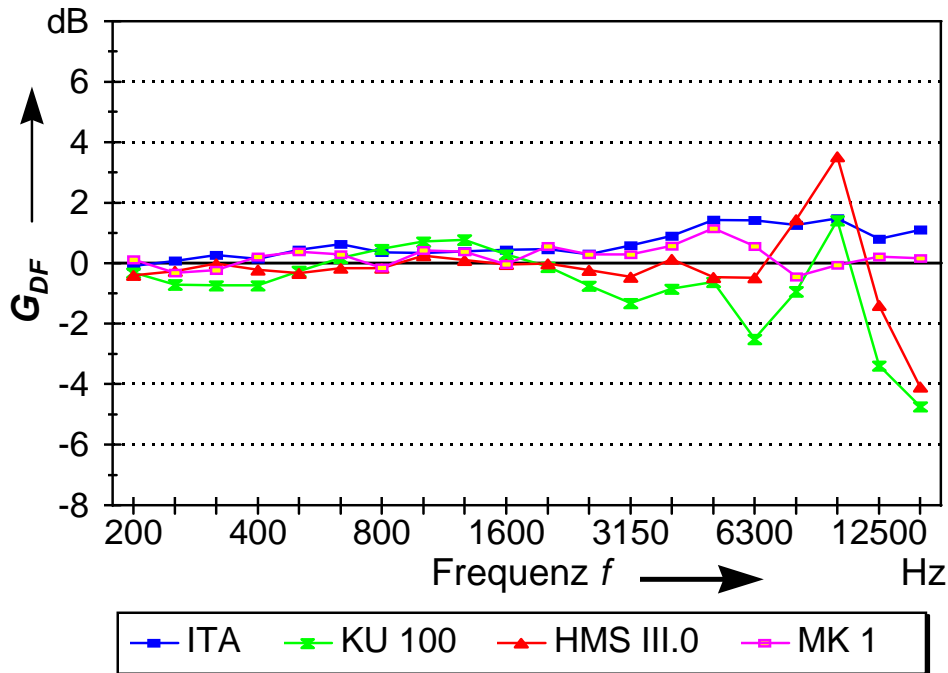


Abb. 3.1.2.2: Diffusfeld-Übertragungsmaß von vier Kunstköpfen mit eingeschalteter Diffusfeld-Entzerrung

Da bei der Signalverarbeitung in der Kopfelektronik zum Teil Digitalfilter für die Realisierung der Entzerrung zum Einsatz kommen, die im allgemeinen eine präzise Nachbildung der Entzerrerfunktionen erlauben, sind die Abweichungen der Kurven von der 0 dB Linie im oberen Frequenzbereich wahrscheinlich auf Fehler bei der Messung und Ermittlung der Filterfunktion zurückzuführen.

3.1.2.4 Freifeld-Diffusfeld-Transformationskurven

Die Freifeld-Diffusfeld-Transformationskurven wurden jeweils aus den Messungen im freien und diffusen Schallfeld unter Einstellung der selben Entzerrung gewonnen. Abb. 3.1.2.3 zeigt die jeweils für beide Ohren gemittelte Transformationskurve der fünf Kunstköpfe.

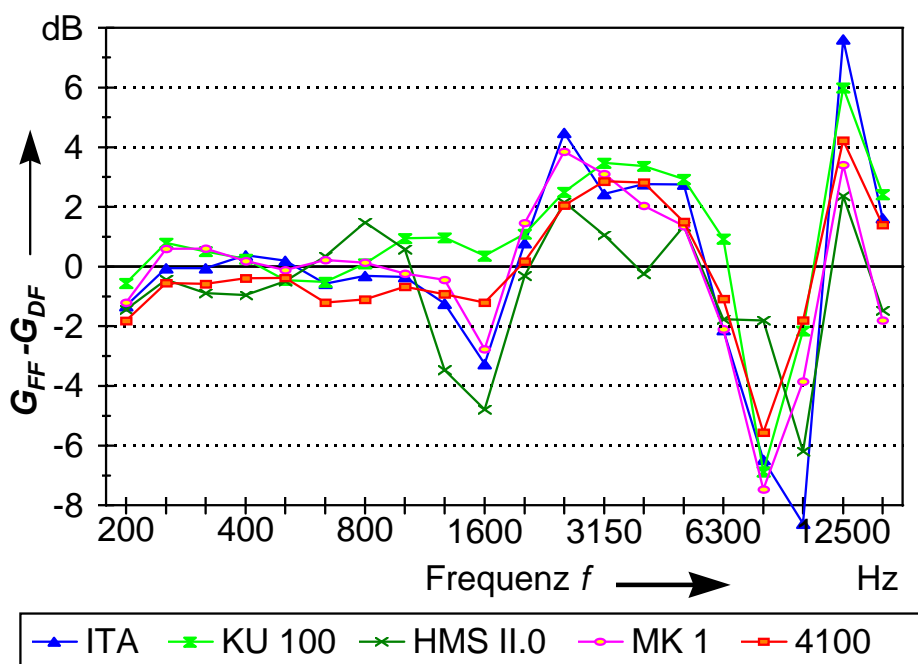


Abb. 3.1.2.3: Freifeld-Diffusfeld-Transformationskurve für fünf Kunstköpfe

Die Kurven liegen in weiten Frequenzbereichen dicht beieinander. Augenfällig ist aber, dass der einzige Kopf ohne Schulternachbildung (KU 100), zwischen 800 Hz und 1600 Hz systematische Abweichungen zeigt. Hier macht sich die fehlende Schulterreflexion bemerkbar.

Abb. 3.1.2. 4 zeigt schließlich die mittlere Transformationskurve der Kunstköpfe im Vergleich zur Hörschwellenkurve nach ISO 389. Vergleicht man nun die mittlere Kunstkopf-Transformationskurve mit denen von natürlichen Versuchspersonen bzw. der Transformationskurve aus der Hörschwellen-Norm ISO 389-7, so fällt auf, dass die signifikanten Abweichungen aus Abb. 1 durch die neuere Messung nicht bestätigt werden können. Die neuere Transformationskurve liegt viel enger an der Kurve der natürlichen Köpfe bzw. der Kurve nach ISO, so dass die verbleibenden Unterschiede nicht größer als die statistischen Streuungen der Ergebnisse für die Vermessung von HRTF von Individuen sind.

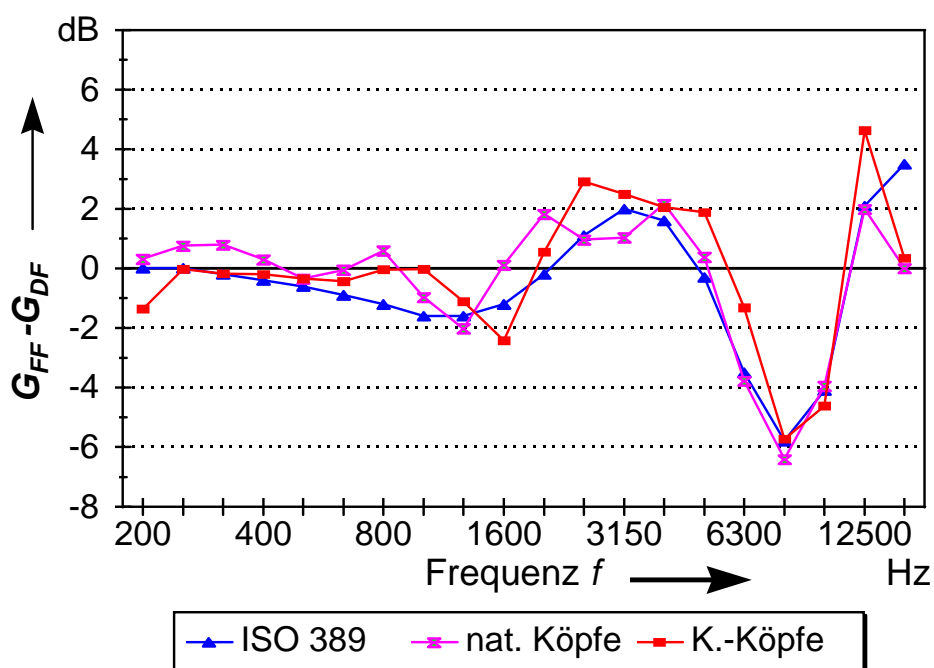


Abb. 3.1.2.4: Vergleich Transformationskurven nach ISO 389 mit der mittleren Transformationskurve der fünf Kunstköpfe und der natürlicher Köpfe nach Vorländer und Shaw

3.1.2.5 Interpretation

Die erfreulich geringen Abweichungen zwischen den Kurven der Kunstköpfe und denen natürlicher Köpfe bzw. nach ISO sind demnach erwartungsgemäß nicht auf geometrische Besonderheiten der Kunstköpfe zurückzuführen. Vielmehr ist zu vermuten, dass das künstliche Diffusfeld für die Messungen von Übertragungsfunktionen nicht hinreichend geeignet ist. Das „diffuse“ Feld im Aufpunkt wird durch vier in Tetraederanordnung abstrahlende Lautsprecher gebildet, die mit unkorreliertem Rauschen betrieben werden. Das Diffusfeld-Übertragungsmaß setzt sich hier letztlich nur aus der Außenohr-Übertragungsfunktion von vier Schalleinfallrichtungen zusammen. Es scheint jedoch bisher nicht hinreichend untersucht, in wieweit gerade diese vier Richtungen repräsentativ für eine integrale Gewichtung sind, wie sie z.B. im diffusen Schallfeld eines Hallraumes erzeugt wird. Es bleibt daher zukünftig zu untersuchen, wie oft und in welcher Weise bei Messungen der Übertragungsfunktion von Köpfen im künstlichen diffusen Schallfeld der Kopf im Schallfeld gegenüber der Lautsprecheranordnung in horizontaler und medianer Achse zu drehen bzw. zu

kippen ist, um durch eine geeignete Mittelung der Messungen eine genügende Anzahl von Außenohr-Übertragungsfunktionen verschiedener Richtung bei der Bildung des Diffusfeld-Übertragungsmaßes einzubeziehen.

3.2 Hörbarkeit von Unterschieden zwischen den Kunstkopf-Systemen (A. Schmitz)

Bei der Kunstkopfaufnahmetechnik ist neben einer hohen klanglichen Treue ebenfalls eine hohe Präzision bei der Richtungslokalisation gefordert. Die klangliche Treue lässt sich durch die Wahl der geeigneten Schnittstelle zwischen Aufnahme- und Wiedergabeseite sowie durch die Realisierung entsprechend präziser Entzerrerkomponenten realisieren (Genuit (1984), Schmitz (1995)). Die Abbildungseigenschaften von Kunstköpfen bzgl. der Lokalisationsschärfe und der Richtungstreue werden unmittelbar dadurch bestimmt, in wie weit die richtungsabhängigen Verzerrungen, die der Kunstkopf bei verschiedenen Schalleinfallrichtungen erzeugt, mit denen der jeweiligen Versuchsperson übereinstimmt. Da sich gemäß Abschnitt 1.5 die Außenohrübertragungsfunktionen zwischen Individuen zum Teil erheblich unterscheiden, wird versucht, durch eine möglichst günstige Kunstkopfgeometrie für viele Zuhörer gute Abbildungseigenschaften zu erreichen. Die verfolgten Philosophien der in Abbildung 1.1 dargestellten Kunstköpfe kann wie folgt untergliedert werden:

1. Abformung eines natürlichen Kopfes einer beliebigen Versuchsperson
2. Abformen eines natürlichen Kopfes einer nach Hörversuchen ausgesuchten Versuchsperson
3. Nachbildung einer vereinfachten, auf die wesentlichen geometrischen Strukturen beschränkte Ohrgeometrie

In der Vergangenheit wurden von vielen Versuchspersonen Hörversuche mit den verschiedenen Kunstkopfsystemen durchgeführt. Eine vergleichende Untersuchung ist jedoch nur von Möller veröffentlicht, die jedoch im wesentlichen auch die Ergebnisse anderer Untersuchungen widerspiegeln. Möller führte u.a. Richtungstests durch, bei denen eine Richtungslokalisation mit Hilfe einer Kunstkopfaufnahme über Kopfhörer erfolgte. Die Ergebnisse waren wie folgt:

1. Die besten Abbildungseigenschaften lassen sich erzielen, wenn der eigene Kopf als Kunstkopf benutzt wird, und somit ausschließlich die eigenen Außenohrübertragungsfunktionen zum Einsatz kommen.
2. Kunstköpfe mit einer durch Hörversuche ausgesuchten Ohrgeometrie zeigen bessere Abbildungseigenschaften als solche, die lediglich eine beliebige Ohrgeometrie nachbilden.
3. Vereinfachte Ohrformen führen im Vergleich zu einer ausgesuchten natürlichen Ohrform bei sonst unveränderter Kopfgeometrie zu einer kaum verminderten Abbildungsschärfe [Genuit (1984), S. 188]
4. Kunstköpfe mit nicht ausgesuchten Ohrformen zeigen tendenziell hohe Fehlerraten insbesondere bei Lokalisationsversuchen in der Medianebene.

3.3 Methodisch bedingte Fehler bei binauralen Hörversuchen (M. Zollner, P. Daniel)

Für Hörversuche gibt es drei Situationen: Die Versuchsperson hört den Originalschall (in situ), oder sie wird über Kopfhörer oder Lautsprecher beschallt. Während bei den Aussagen der Versuchspersonen statistische Schwankungen durch geeignete Mittelungsverfahren verringert werden können, lassen sich systematische Schwankungen auch durch Mittelung nicht reduzieren. Im folgenden werden einige dieser systematischen Fehler diskutiert.

3.3.1 Freies Schallfeld

Für die Beschallung von Versuchspersonen im freien Schallfeld wird häufig nur der Schallpegel definiert, der in Kopfmittle bei Abwesenheit der Versuchsperson gemessen wird. Hierzu muß beachtet werden, dass ein allgemeines Schallfeld an einem Punkt nicht definiert werden kann, es sei denn man bildet beliebig hohe räumliche Ableitungen. Alternativ könnte auch an jedem Punkt im Schallfeld der Schalldruck bestimmt werden. Eine Versuchsperson stellt einen im Vergleich zur Wellenlänge großen Beugekörper dar, der Schallwellen an seinen Begrenzungsflächen reflektiert. Diese Reflexionen erreichen zusammen mit dem Originalschall das Gehör. Es ist bekannt, dass die Ohren nicht in Kopfmittle sitzen, sondern seitlich am Kopf. Aus diesem Grund wäre es zweckmäßig, das Schallfeld nicht in Kopfmittle, sondern an der Stelle der Ohren zu vermessen. Auch in guten reflexionsarmen Räumen ändert sich der Pegel um ± 1 dB, wenn der Ort des Mikrofons um ± 10 cm verändert wird. Glasfaserkeile, die 99% Energie absorbieren, reflektieren 1 %, was einer Absorptionsdämpfung von 20 dB entspricht. Bereits eine derartige Reflexion kann kammfilterartige Abweichungen des Frequenzganges der Übertragungsfunktion vom Sollwert in der Größenordnung von ± 1 dB erzeugen. Zusätzlich entstehen messbare Fehler durch Lampen, Drehtische, Stromversorgungen, Stativstangen, auch wenn diese 1 m entfernt stehen (Zollner 1982).

Bei einer sitzenden Versuchsperson sind neben den Schulterreflexionen vor allen Dingen die Kniereflexionen zu beachten. Sie können Pegeländerungen von 3 dB verursachen. Dies wurde am Beispiel einer stehenden Versuchsperson nachgewiesen, deren Kopf durch ein Beißbrett fixiert war. Der Schallpegel im Gehörgang wurde durch Sondenmikrofone bestimmt. Allein durch Anheben eines Beines konnten Schallpegeländerungen von ± 3 dB verursacht werden. Wenn nun für alle Versuchspersonen dieselbe Sitzposition, derselbe Lautsprecherabstand und derselbe Lautsprecher verwendet würden, so würden sich ähnliche Meßfehler ergeben. Häufig wird aber der Lautsprecherabstand zwischen 1 bis 4 m (je nach Raumgröße) variiert, und es kommen unterschiedliche Lautsprecher mit unterschiedlicher Bündelung zum Einsatz. Kleine Lautsprecher können einen großen Frequenzbereich abstrahlen, bündeln wenig, verzerren aber stark. Mehrwegsysteme sind bezüglich Frequenzunabhängigkeit der Übertragungsfunktion und Klirrfaktor günstiger, bilden aber räumlich getrennte Schallquellen. Koaxialsysteme stellen eine überlegenswerte Alternative dar. Um systematische Fehler bei der Freifeldbeschallung von Versuchspersonen zu vermeiden, ist es zweckmäßig, das Schallfeld an mehreren Punkten zu vermessen. Für Versuche mit hoher Meßgenauigkeit sollten Arm- und Beinhaltung dokumentiert werden. Nicht immer muß sichergestellt sein, daß der im Gehörgang erzeugte Schallpegel für alle Versuchspersonen identisch ist. Es sollen ja auch interindividuelle Unterschiede bestimmt werden, und diese können von unterschiedlicher Körpergröße kommen. Für interinstitutionelle Vergleiche ist es aber hilfreich, wenn die einzelnen Ursachen bekannt sind.

3.3.2 Diffuses Schallfeld

Ein diffuses Schallfeld wird entweder im Hallraum oder mit mehreren inkohärent strahlenden Lautsprechern im reflexionsarmen Raum erzeugt. Zum Nachweis der Diffusität wird manchmal gefordert, dass der Schalldruck ortsunabhängig und die Schallschnelle orts- und richtungsunabhängig sind. Die Intensitätsmeßtechnik, der ein großer kommerzieller Erfolg beschieden war, wird ebenfalls gerne zur Bestimmung der Diffusität eingesetzt, in der Hoffnung, die Messgenauigkeit möge proportional zum Gerätepreis verlaufen. Dass ortsunabhängige Intensität eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für Diffusität ist, zeigt folgendes einfache Beispiel: 4 an den Ecken eines Quadrats angeordnete gleichartige Lautsprecher strahlen stationäres, inkohärentes, gleichartiges Rauschen ab. Ein im Zentrum angeordnetes Dipolmikrofon misst in der Lautsprecherebene in jede Richtung im Mittel dasselbe Signal. Beim Einsatz eines stark bündelnden Richtmikrofons bzw. eines quadratischen Quadrupolmikrofons (Kleeblatt) ergibt sich demgegenüber eine starke Richtungsabhängigkeit, die in einem diffusen Schallfeld nicht auftreten würde. Messungen mit 4 Lautsprechern (Vorländer) bzw. 8 Lautsprechern (Veit) sind somit Messungen im Freifeld, bei denen anstelle eines Lautsprechers 4 bzw. 8 verwendet wurden. 8 ist mehr als 1, aber etwas weniger als unendlich. Bei Kunstkopfmessungen in einem durch 4 Lautsprecher simulierten diffusen Schallfeld wurden gegenüber einem echten Diffusfeld Abweichungen von 5 dB gefunden.

3.3.3 Räumliches Hören

Die räumlich richtige Abbildung von Schallquellen, d.h. die Übereinstimmung von Schallereignisort und Hörereignisort, ist bei vielen Hörversuchen unbefriedigend. Aufnahmen mit einem Einzelmikrofon erlauben grundsätzlich keine Richtungsübermittlung, da der Schalldruck ein richtungsunabhängiger Skalar ist. Aufnahmen mit Stereomikrofonen gestatten immerhin die Übertragung von Intensitäts- und/oder Laufzeitunterschieden, bilden aber die vom menschlichen Kopf verursachten Schallfeldstörungen nicht nach. Kunstkopfaufnahmen sollten eigentlich eine perfekte Raumabbildung ermöglichen, ergeben aber häufig Ortungsunsicherheiten in der Medianebene. Schallquellen, die vor dem Kunstkopf stehend aufgenommen wurden, werden bei Hörversuche oft hinten geortet. Ein Grund hierfür ist, dass das menschliche Gehör als zeitinvariantes System betrachtet wurde, was es aber nicht ist.

Dies zeigt folgendes Experiment: In einem normalen Zimmer wurde vor einem Kunstkopf in 1 m Abstand ein Lautsprecher aufgestellt. Der Lautsprecher strahlte nacheinander 3 Rauschimpulse ab, zu deren Erzeugung ein thermischer Rauschgenerator (Rosa Rauschen) für jeweils 2 s ein- bzw. ausgeschaltet wurde. Die drei Rauschimpulse waren somit ähnlich, aber nicht identisch. Die Signale wurden über Kunstkopf auf Festplatte aufgenommen und über geeignet entzerrten Kopfhörer Versuchspersonen dargeboten. Zunächst wurden die Versuchspersonen nur befragt, wo das gehörte Signal herkommt. Einige antworteten "von hinten", andere meinten "nicht ortbar, diffus im Raum". Der zweite Versuch enthielt ein kurzes Training. Hierzu wurde ein Klappergeräusch erzeugt, das sich mehrmals um den Kunstkopf bewegte, wozu immer die Richtung mit angesagt wurde. Das Training dauerte etwa 1/2 Minute. Unmittelbar darauf wurden wieder die gleichen 3 Rauschimpulse eingespielt. Alle Versuchspersonen gaben nun an, das Geräusch komme von vorne. In einem darauffolgenden 3. Versuch wurde nach Training und 3 Rauschimpulsen ein 4. Rauschimpuls als Störgeräusch dargeboten. Hierbei handelte es sich um ein diotisches Rauschen (gleiches Signal auf beiden Hörern), das vom linken Kunstkopfhörer abgeleitet wurde. Nach diesem diotischen Rauschen wurde der erste Rauschimpuls wiederholt (Training, ABCXA). Bei fast allen Versuchspersonen war die Antwort eindeutig: Vorne, vorne, vorne, im Kopf, hinten.

Dasselbe Schallsignal (A) wurde somit unterschiedlich wahrgenommen. Dies widerspricht der Vermutung, daß Hörwahrnehmungen eindeutig durch den Schalldruck am Trommelfell definiert sind.

Die Ergebnisse werden folgendermaßen erklärt: Das Gehör benötigt zur Unterdrückung früher Echos adaptive Filter (Präzedenzeffekt, Blauert 1993). Die Parameter dieser Filter werden laufend aktualisiert, aber nur, solange das Hörereignis plausibel erscheint. In einer neuen oder unbekanntenen Situation werden die Parameter auf einen Default-Wert zurückgesetzt. Während das Konditionieren der Filter durchaus eine halbe Minute dauern kann, erfolgt das Rücksetzen sehr schnell. Es wird vermutet, daß das Training umso leichter fällt, je vertrauter ein Geräusch ist. Die Vorne-Ortung bei Kunstkopfaufnahmen fällt schwer, weil der Kunstkopf in seiner Richtcharakteristik nicht perfekt dem eigenen Kopf entspricht. Durch ein Training kann diese Unzulänglichkeit beseitigt werden, worauf präzise Vorne-Ortung möglich ist. Versuche mit Kunstköpfen von zwei anderen Herstellern haben diese Ergebnisse bestätigt. Eine einzige ungewohnte Hörsituation (diotisches Rauschen) zerstört das Gelernte. An das Training sind hohe Anforderungen zu stellen: In einem weiteren Versuch wurden Lautsprecher und Kunstkopf in gleichem Abstand zueinander, aber an je zwei unterschiedlichen Orten im selben Raum aufgestellt (Pos. 1 bzw. Pos. 2). Das Training wurde einmal für Pos. 1 und einmal für Pos. 2 auf Festplatte aufgenommen, ebenso die Rauschimpulse. Anschließend wurde einer Versuchsperson das an Pos. 1 aufgenommene Training mit nachfolgend an Pos. 2 aufgenommenen Rauschimpulsen vorgespielt. Das Rauschen wurde hinten geortet, genauso wie bei Training: Pos. 2, Rauschen: Pos. 1. Obwohl alle Schalle im selben Raum mit gleichem Nachhall aufgenommen wurden, ist das an anderer Position aufgenommene Training ungeeignet, weil die frühen Reflexionen nicht passen.

Die gefundenen Ergebnisse stellen binaurale AB-Vergleiche grundsätzlich in Frage. Das schnelle Umschalten zwischen zwei Schallen, das beim AB-Vergleich kleine Unterschiedsschwellen ermöglicht, wird durch ein Training allein aus Zeitgründen verhindert. Die ohne Training erzielten Aussagen sind aber auch nur mit Einschränkungen brauchbar, weil die adaptiven Filter u.U. falsch eingestellt sind. Ob diese Filter nur die Richtungswahrnehmung beeinflussen, oder darüber hinaus sogar Feinkorrekturen an Lautheits- oder Klangfarbenwahrnehmungen durchführen, kann noch nicht abgeschätzt werden. Erste Hinweise wurden von Winkler (1992) erwähnt.

3.3.4 Unterschiede zwischen Lautstärke- und Sondenvergleichsmessungen

Fastl et al. (1985) berichten über Schalldruckmessungen im Gehörgang von Versuchspersonen berichtet, die mit Kopfhörer oder Lautsprecher im freien Schallfeld von vorne beschallt wurden. Für Sinustöne zeigte sich, dass für subjektiv gleiche Lautheit bei Kopfhörerbeschallung ein höherer Schallpegel im Gehörgang nötig ist. Die Unterschiede betragen im Mittel bis zu 5 dB. Diese Ergebnisse stützen ähnliche Messergebnisse von Weingartner (1971) und Theile (1984).

In der Zwischenzeit wurden Vermutungen geäußert, daß das Gehör nicht nur durch Luftschall, sondern auch durch Körperschall (Knochenleitung) angeregt wird. Diese Hypothese konnte mit folgendem Versuch widerlegt werden: Eine Versuchsperson wurde im reflexionsarmen Raum durch einen 3 m vor ihr stehenden Lautsprecher beschallt. Der Lautsprecher strahlte 2 s dauernde Sinustöne ab, die weich ein- und ausgeschaltet wurden. Die Versuchsperson setzte abwechselnd einen rückseitig offenen elektrostatischen Kopfhörer auf und ab, so daß sie einmal direkt vom Lautsprecher und einmal durch den Kopfhörer hindurch vom Lautsprecher beschallt wurde. Der Kopfhörer war elektrisch nicht angeschlossen. Die vom Kopfhörer verursachte (geringfügige) Dämmung konnte beim Lautsprecherpegel

kompensiert werden. Obwohl in beiden Fällen Luft- und Körperschall gleich waren, ergab sich ein eindeutiger Unterschied: Bei gleicher Lautheit wurde bei aufgesetztem Kopfhörer im Gehörgang ein größerer Pegel gemessen. Die Erwartungshaltung der Versuchsperson beeinflusst also offensichtlich die Wahrnehmung. Ähnliche Untersuchungen wurden von Genuit (1986) durchgeführt, wobei der Kopfhörer immer auf dem Kopf blieb; Lautsprecher und Kopfhörer wurden abwechselnd eingeschaltet. Genuit fand keinen Pegelunterschied, was ebenfalls gegen eine Knochenleitungstheorie spricht.

Stoll und Theile (1986) zeigten, dass sich dieser *Schalldruckpegel-Laustärke-Divergenz-Effekt (SLD-Effekt)* bei der Wiedergabe im Diffusfeld verringert und bei Verwendung von Kunstkopfaufnahmen im Diffusfeld bei der Kopfhörerwiedergabe kaum noch vorhanden ist. Der SLD-Effekt ist jedoch nicht zu verwechseln mit dem „missing-6-dB-effect“ (Rudmose), der nur bei tiefen Frequenzen nahe der Hörschwelle messbar ist. Neuere Untersuchungen haben ergeben, dass bei absolut exakter individueller Entzerrung der Lautsprecher und Kopfhörer mit Abweichungen maximal im 0,1-dB-Bereich keinerlei Diskrepanz der Hörschwellen zwischen Lautsprecher- und Kopfhörerwiedergabe festzustellen ist (Kleber et al 2002). Bezüglich überschwelliger Stimuli wird zur Zeit vermutet, dass die Versuchspersonen eine Erwartungshaltung haben: Der Lautsprecher steht weit entfernt, er darf also einen kleineren Pegel erzeugen und wird trotzdem als gleich laut empfunden. Eine Versuchsperson gab an, Kopfhörer und Lautsprecher seien gleich laut, aber der Sinuston aus dem Kopfhörer klinge „voller“. Bei objektiv höherem Pegel ist dies vorstellbar.

3.3.5 Störgeräusche

Bei Hörversuchen sind an die Wiedergabequalität hohe Anforderungen zu stellen. Obwohl ein hochwertiger Lautsprecher verwendet wurde, waren bei Sinustönen im Vergleich zum Kopfhörer manchmal nichtlineare Verzerrungen hörbar. Ohne direkten Vergleich wurde der Lautsprecher als verzerrungsfrei eingestuft. Nachdem der Lautsprecher um 90° gedreht wurde, klang er genauso wie der Kopfhörer; offensichtlich wurden die Verzerrungen stärker gebündelt abgestrahlt. Schaltknacke, die häufig kohärent auf beiden Kanälen auftreten, und deshalb im Kopf geortet werden, sind zu vermeiden, da durch sie die adaptiven Gehörfilter gestört werden können. Ebenso ist (auch leises) Rauschen zu vermeiden, da es entweder keine interaurale Korrelation besitzt (Kopfhörer, dichotisch) oder stark korreliert ist (Lautsprecher 0°). In beiden Fällen entsteht ein eher unnatürlicher Eindruck.

3.3.6 Kopfhörerbedingte Unterschiede

Rückseitig offene Hörer schirmen den Umgebungsschall fast nicht ab, rückseitig geschlossene Hörer erzeugen im höheren Frequenzbereich Schalldämmungen von etwa 30 dB. Sie erhöhen aber auch die körpereigenen physiologischen Geräusche, weswegen es vor allem im Bereich tiefer Frequenzen zu einer Verschiebung der Ruhehörschwelle kommt. Bei rückseitig offenen Hörern ist zu berücksichtigen, dass die Membranaußenseite durch die akustische Impedanz des umgebenden Raumes belastet wird. Raumresonanzen können somit die frequenzabhängige Übertragungsfunktion des Kopfhörers beeinflussen, insbesondere bei elektrostatischen Hörern mit leichter Membran. Ein DIN-A4-großer Reflektor, der 20 cm neben den Kopf gehalten wird, verändert die Übertragungsfunktion des Kopfhörers kammfilterartig um ± 2 dB. Ähnliches gilt für weitere Kopfhörer, die kohärent in geringer Entfernung betrieben werden. Auch Hände, neben den Kopf gehalten, ergeben entsprechende Fehler.

Die Passung Kopfhörer/Kopf kann im Frequenzbereich unter 200 Hz zu interindividuellen Pegelunterschieden von 20 dB führen. Auch im höherfrequenten Bereich ergeben sich starke Pegelunterschiede, da hier die Plazierung des Kopfhörers eine wichtige Rolle spielt.

4. Fazit und Ausblick (H. Fastl)

Die ausführlichen Beratungen der Arbeitsgruppe "Kunstkopftechnik" des Normenausschusses NA 001-01-02-08 AK haben gezeigt, dass beim derzeitigen Stand der Technik bei Verwendung von Kunstkopfsystemen verschiedener Hersteller grundsätzlich Unterschiede in den Messwerten auftreten werden. Trotz zahlreicher Bemühungen kann derzeit ausgeschlossen werden, dass "Korrekturfunktionen" bei vertretbarem Aufwand Abhilfe schaffen werden. Vor diesem Hintergrund wurde sondiert, ob Anwender von Kunstköpfen eine (herstellerunabhängige) einheitliche Schale begrüßen würden, um rein geometrisch bedingte Unterschiede in Kunstkopfaufnahmen zukünftig auszuschliessen. Die Reaktionen von Kunstkopfanwendern in Europa, Japan und USA waren durchweg positiv (vgl Fastl (2004)), so dass ein entsprechendes Projekt in Angriff genommen werden sollte. Angesichts der Tatsache, dass die derzeit verwendeten Kunstköpfe auch von Nichtfachleuten auf Anhieb als "zu klein" eingestuft werden, bedeutet dies umfangreiche Untersuchungen, die zwar von einem nationalen Gremium angestoßen, jedoch nur in internationalen Kooperationen durchgeführt werden können.

Literatur

Ando, Y. (1990): Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo. *J., Acoust. Soc. Am.* 62 (1977), 1436.

Asano, F. Suzuki, Y, Sone, T. (1990): Role of spectral cues in the median plane. *J. Acoust. Soc. Am.* 88 (1990) 159–168.

Atal, B.S., Schröder, M.R. (1967): *Journal of the Audio Engineering Society.*

Barron, M. (1971): The subjective effect of first reflections in concert halls - The need for lateral reflections. *J. Sound Vib.* 15 (1971), 475.

Beranek, L. (1992): Concert hall acoustics – 1992. *J. Acoust. Soc. Am.* 92 (1992), 1.

Blauert J. (1993): Anomalien des Gesetzes der ersten Wellenfront, DAGA '93, 788-791.

Blauert, J. (1996): *Spatial Hearing.*

Brinkmann K. und Richter U. (1987): Zur Messunsicherheit bei psychoakustischen Messungen. DAGA 87, 593-596.

Burkhard, M.D. and Sachs, R.M. (1975): Anthropometric manikin for acoustic research, *J. Acoust. Soc. Am.* 58/1, (1975), 214

Butler R.A. und Musicant A. D. (1993): Binaural localization: Influence of stimulus frequency and the linkage to covert peak areas. *Hearing Res.* 67, 220-229.

DIN 45 619 -1 (1975): Kopfhörer. Bestimmung des Freifeld- Übertragungsmaßes durch Lautstärkevergleich mit einer fortschreitenden Schallwelle. (Headphones: determination of the free-field sensitivity level by loudness comparison with a progressive sound wave).

DIN ISO 11904 -1 (2002): Bestimmung der Schallimmission von ohrnahen Schallquellen: Verfahren mit Mikrofonen in menschlichen Ohren (MIRE Verfahren).

DIN ISO 5725 (1981): Bestimmung von Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit durch Ringversuche.

Fastl, H., Schmid W., Theile G., Zwicker E. (1985): Schallpegel im Gehörgang für gleichlaute Schalle aus Kopfhörern oder Lautsprechern, DAGA '85, 471.

Fastl, H. (2004): Towards a new Dummy Head? *Proc. Internoise 2004.*

Fedtke, T. (1992): Messung der Schalldämmung von Gehörschützern mit verschiedenen Kopfnachbildungen. *Fortschritte der Akustik, DAGA '92, DPG-GmbH, Bad Honnef, 385-388.*

Fedtke, T. (1998): Zur Messung von Kunstköpfen im freien Schallfeld DAGA '98, 146-147.

Gardner M. B. und Gardner R. S. (1973): Problem of localization in the median plane: effect of pinnae cavity occlusion. *J. Acoust. Soc. Am.* 53 (1973) 400–408.

Genuit, K. (1984): Ein Modell zur Beschreibung von Außenohrübertragungseigenschaften, Dissertation RWTH Aachen.

Genuit, K. (1986): Untersuchung der psychoakustischen Eigenschaften von Hörereignissen bei der Kopfhörerwiedergabe, DAGA '86, 489-492.

Genuit, K. (1988): Kunstkopf-Messtechnik - Ein neues Verfahren zur Geräuschdiagnose und -analyse. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 35, Dez. 1988, S. 103-108

Genuit, K. (1996a): Grundlagen der Psychoakustik, HDT-Essen „Fahrzeugakustik“, 03.-04.12.1996, Essen

Genuit, K. et al. (1996b): Standardisierung der Richtcharakteristik von Kunstkopf-Meß-Systemen. Fortschritte der Akustik - DAGA 96, Oldenburg 1996, 274-275.

Genuit, K., et.al. (1997): Entwicklung einer Messtechnik zur physiologischen Bewertung von Lärmeinwirkungen unter Berücksichtigung der psychoakustischen Eigenschaften des Menschlichen Gehörs Schriftenreihe der BAU, Fb 774, Dortmund/Berlin 1997.

Gottlob, D. (1973): Vergleich objektiver Parameter mit Ergebnissen subjektiver Untersuchungen an Konzertsälen. Dissertation Universität Göttingen 1973.

Hammershøi, D., Møller, H. (1992): Binaural auralization: Head-related transfer functions measured on human subjects, Proceedings of the 93rd Audio Engineering Society Convention, San Francisco, October 1-4, 1992, preprint 3422, pp. 1-7.

IEC 60268-7 (1996): Sound system equipment. part 7: Headphones and headsets.

ITU-T (1996): Recommendation P.58 – "Head and torso simulator for telephonometry", International Telecommunication Union, Geneva.

Kleber, J., Martín Cruzado, C. G. (2002): Influence of the acoustic impedance of headphones Forum Acusticum (2002). Paper P-261.

Kuhn, G.F., Burnett, E.D. (1977): Acoustic Pressure Field Alongside A Manikin's Head With A View Towards In Situ Hearing Aid Testing, J. Acoust. Soc. Am. 62 (1977), 416.

Lehmann, P. (1976): Über die Ermittlung raumakustischer Kriterien und deren Zusammenhang mit subjektiven Beurteilungen der Hörsamkeit. Dissertation TU Berlin 1976.

Lentz, T., Schmitz, O. (2002): Realisation of an adaptive cross-talk cancellation system for a moving listener. Proc. 21st Audio Eng. Soc. June 2002, p, 297-301.

Middlebrooks J. C. (1992): Narrow-band sound localization related to external ear acoustics. J. Acoust. Soc. Am. 92 (1992) 2607–2624.

Moeller, H. (1989): Reproduction of artificial head recordings through loudspeakers., Journal of the Audio Engineering Society. 37 (1989), 30-33.

Moeller, H., Hammershøi, D. Hundebøll, J.V., Jensen, C.B. (1992): Transfer

characteristics of headphones: measurements on 40 human subjects, Proceedings of the 92nd Audio Engineering Society Convention, Vienna, March 24-27, 1992, preprint 3290, pp. 1-28.

Moeller, H., Jensen, C. B., Hammershoei D., Soerensen F. (1995): Design Criteria for Headphones: J. Audio eng. Soc., Vol 43 1995, 218-232.

Moeller, H., Soerensen F., Jensen, C. B., Hammershoei D. (1996): Binaural Technique: Do we need individual Recordings? J. Audio eng. Soc., Vol 44, 1996, 451-469.

Moeller, H., Hammershøi, D. Hundebøll, J.V., Jensen, C.B., Sørensen, M.F. (1999a): Evaluation of artificial heads in listening tests, Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 47, No. 3, March 1999, pp. 83-100.

Moeller, H. (1999b): Localization in real life and with individual, nonindividual, and artificial head binaural recordings, Joint Meeting 137th Regular Meeting of the Acoustical Society of America, 2nd Convention of the European Acoustics Association: Forum Acusticum 99 integrating the 25th German Acoustics DAGA Conference, 15-19 March 1999, Berlin, Germany. Abstract in The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 105, No. 2, Pt. 2, February 1999, p. 1035 (paper 2aSP2).

Neu G., Mommertz E., Schmitz A. (1992): Untersuchungen zur richtungstreuen Schallwiedergabe bei Darbietung von kopfbezogenen Aufnahmen über zwei Lautsprecher I. ACUSTICA (1992), Vol. 76, 183 - 192.

(Der) Rat (1987): Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Umweltgutachten, Kohlhammer Verlag GmbH, Stuttgart und Mainz, 1987

Roffler S. K. und Butler R. A. (1968) : Factors that influence the localization of sound in the vertical plane. J. Acoust. Soc. Am. 43 (1968) 1255–1259.

Rudmose W. (1982): The case of the missing 6 dB. J. Acoust. Soc. Am. 71 (1982) 650–658.

Schmitz, A., Vorländer, M. (1990): Messung von Außenohrstoßantworten mit Maximalfolgen-Hadamard-Transformation und deren Anwendung bei Versuchen zum ichtungshören. Acustica Vol. 71 (1990), 257-268.

Schmitz, A. (1995): Ein neues digitales Kunstkopfmesssystem, Acustica 81 (1995), 416-420.

Schmitz, A. (1993): Naturgetreue Wiedergabe kopfbezogener Schallaufnahmen über zwei Lautsprecher mit Hilfe eines Übersprechkompensators., Dissertation, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen (1993).

Schroeter, J., Poesselt, C. (1986): The use of acoustical test fixtures for the measurement of hearing protector attenuati-on. Part II. J Acoust. Soc. Am. 80(2), 1986, 505-527

Siebrasse, K.F. (1973): Vergleichende subjektive Untersuchungen zur Akustik von Konzertsälen. Dissertation Universität Göttingen 1973.

Spikofski G. (1988): Das Diffusfeldsonden-Übertragungsmass eines Studiokopfhörers. Rundfunktechnische Mitteilung

Stoll G., Theile G. (1986): Gegenüberstellung von Lautstärke- und Sondenvergleichsmessungen zur Bestimmung des Kopfhörer-Übertragungsmaßes im Diffusen Schallfeld. DAGA '86, 777-778.

Theile G.(1981a): Zur Theorie der optimalen Wiedergabe von Stereophon Signalen über Lautsprecher und Kopfhörer. Rundfunktechnische Mitteilungen, Vol 25 1981, 155-170.

Theile, G.(1981b): Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit Intensitätsstereophon Signalen bei Lautsprecherwiedergabe. Rundfunktechnische Mitteilungen, Vol 25 1981, 146-154.

Theile, G. (1984): Sind Klangfarbe und Lautstärke vollständig determiniert durch das Schalldruckpegel-Spektrum am Trommelfell. DAGA 84, 747-752.

Veit I, Sander H (1987): Production of Spatially Limited "Diffuse" Sound Field in an Anechoic Room. J. Audio eng. Soc.35, 3, 1987, 138 - 143.

Vorländer M. (1991): Freifeld- und Diffusfeld-Übertragungsmaße von natürlichen Köpfen und von Kunstköpfen. ACUSTICA 74, 1991, 192 - 200.

Weingartner, B. (1971): Neuere Vergleichsmessungen an Kopfhörern, AES Köln 1971.

Winkler (1992): Sehen beim Hören, DAGA 92, 181-184.

Zollner, M. (1982): Einfluß von Stativen und Halterungen auf den Mikrofonfrequenzgang. ACUSTICA (1982), Vol. 51, 268 - 272.

Zollner, M. (1995a): Kopfhörerbedingte Unterschiede bei Hörversuchen. DAGA 95, S. 919 – 922.

Zollner, M. (1995b): Methodisch bedingte Fehler bei binauralen Hörversuchen. DAGA 95. S. 779 – 782.

Zollner, M. (1998): The human hearing system as a time variant system. Euro-noise 98. 719-724.

Zwicker und Fastl (1999): Psychoacoustics, Springer 1999.