

25 Jahre

# RTM

## Rundfunktechnische Mitteilungen

Herausgegeben im Auftrage der Arbeitsgemeinschaft  
der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten der  
Bundesrepublik Deutschland sowie des Zweiten  
Deutschen Fernsehens vom

Institut für Rundfunktechnik GmbH **IRT**

## Ausgewählte Aufsätze zum Thema Kunstkopfstereofonie

Zusammengestellt anlässlich der  
Internationalen Funkausstellung Berlin 1981  
und der 12. Tonmeistertagung München 1981

|                                       |                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Georg Plenge</i>                   | Vorwort                                                                                                                            |
| <i>Herbert Hudde, Jürgen Schröter</i> | Verbesserungen am Neumann-Kunstkopfsystem                                                                                          |
| <i>Günther Theile</i>                 | Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen<br>Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsabbildung |
| <i>Günther Theile</i>                 | Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen<br>Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Klangfarbe         |
| <i>Horst Wollherr</i>                 | Mikrofonankopplung an das Außenohr eines neuen Kunstkopfes                                                                         |
| <i>Günther Theile</i>                 | Zur Theorie der optimalen Wiedergabe stereofoner Signale über<br>Lautsprecher und Kopfhörer                                        |

# Kunstkopf- Stereophonie mit MKE 2002



Übertragungsbereich: 40... 20.000 Hz  
Richtcharakteristik: Kugel  
Elektrische Impedanz: ca. 1,5 kOhm  
Empfindlichkeit: 10 mV/Pa

**D**as Kopf-Stereo-Mikrofon MKE 2002 war ursprünglich für den Tonband-Amateur bestimmt. Die nur mit dieser Lösung gebotene, sehr unauffällige und extrem bewegliche Aufnahmetechnik hat jedoch dazu geführt, daß verschiedene europäische Rundfunkanstalten Kunstkopf-Produktionen mit dem MKE 2002 aufgezeichnet haben, so z.B. der Bayerische Rundfunk in dem Blinden-Hörbild „Die mit den Ohren sehen“. Auch Ihr Handwerkzeug kann das Kopf-Stereo-Mikrofon MKE 2002 sein:

- Zwei hochwertige Kondensatorkapseln in Elektret Technik
- Hoher Geräuschspannungsabstand (64 dB)
- Sehr geringes Gewicht

Die mit Hilfe einer Tongabel an den Ohren positionierten Mikrofone fangen das Schallfeld so auf, wie Sie es normalerweise hören. Das Ergebnis hören Sie dann am besten über Sennheiser-Kopfhörer ab.

 **SENNHEISER**  
Perfekter Klang hat seinen Namen

Sennheiser electronic KG  
3002 Wedemark 2  
Tel. 0 51 30-5 83-1

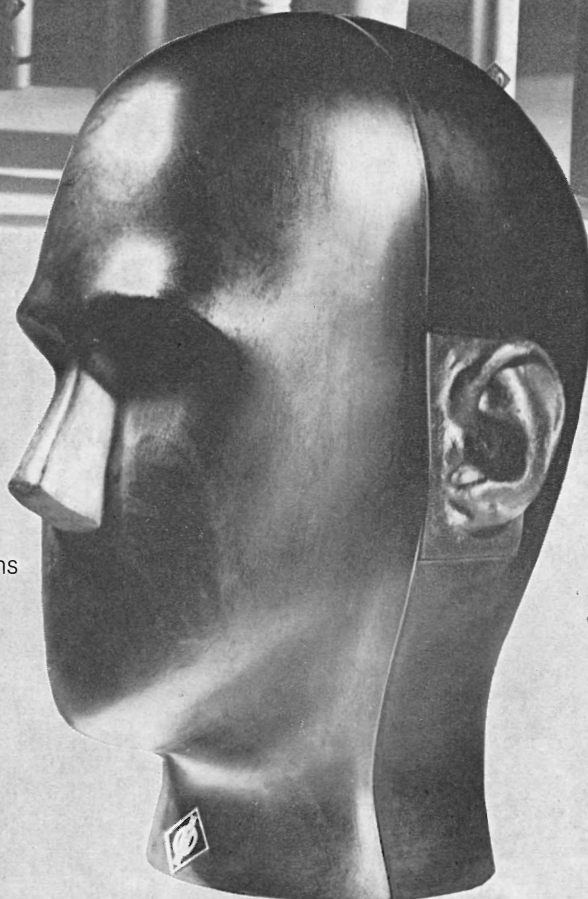
## INFO-COUPON

- ☐ Bitte, senden Sie mir mehr Informationen über das Sennheiser MKE 2002-System
- ☐ Ja, ich will mich von der plastischen Tonwirkung überzeugen.  
Für eine Demo-Schallplatte füge ich DM 4,00 in Briefmarken bei.





## NEUMANN KONDENSATOR MIKROPHONE



### KU 81 – DER KUNSTKOPF

Die Außenohren sind den natürlichen Ohren in Gestalt und Material genau nachgebildet. Der Diffusfeldfrequenzgang ist so entzerrt, daß er dem eines hochwertigen Stereomikrophons entspricht. Aufnahmen mit dem Kunstkopf KU 81 sind dadurch lautsprecherkompatibel. Mit Stereokopfhörern ergibt sich eine naturgetreue Richtungs-, Entfernungs- und Halligkeitsabbildung.

GEORG NEUMANN GMBH  
Charlottenstraße 3 · D-1000 Berlin 61  
Tel. (030) 251 40 91 · Telex 0184 595



## VORWORT

VON GEORG PLENGE<sup>1</sup>

Die ARD und das Institut für Rundfunktechnik werden auch in diesem Jahr wieder Kunstkopfaufnahmen während der Funkausstellung vorführen. Zu diesem Anlaß geben die Rundfunktechnischen Mitteilungen diesen Sonderdruck heraus. Er enthält 5 Aufsätze, die den jüngsten Stand der Entwicklung und der theoretischen Untersuchungen zur kopfbezogenen Stereophonie zeigen, soweit diese Arbeiten im Institut für Rundfunktechnik im Auftrage der ARD durchgeführt worden sind. Für einen Teilbereich der Arbeiten hat das IRT das Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Akustik der Ruhruniversität Bochum unter Leitung von Prof. J. Blauert um Unterstützung gebeten. Das Ergebnis dieser Untersuchungen findet sich im Aufsatz von H. Hudde und J. Schröter.

Zunächst sei aber eine kurze Betrachtung der Historie und der speziellen Problematik der kopfbezogenen Stereophonie im Rundfunk vorangestellt.

Nach der ersten Vorstellung des Kunstkopfes auf der Funkausstellung 1973 sind inzwischen 8 Jahre vergangen, ohne daß wesentliche Veränderungen dieses ersten Konzepts der kopfbezogenen Stereophonie erfolgten.

Obwohl die kopfbezogene Stereophonie sofort mit großer Zustimmung durch die Hörer aufgenommen worden ist, wurde doch bald offenbar, daß diese Technik noch Mängel hat und verbesserungsbedürftig ist. Dies betraf insbesondere zwei Punkte:

1. Die Übertragungseigenschaften des Kunstkopfes waren unbefriedigend in bezug auf die Ortung der Schalleinfallrichtungen im vorderen Bereich.
2. Kopfbezogene Aufnahmen hörten sich bei Wiedergabe über Lautsprecher unnatürlich an; die Klangfarben waren verfälscht!

Nun darf man nicht vergessen, daß der Einsatz des Kunstkopfes im Rundfunk zunächst ein Nebenprodukt einer Entwicklung war, die ganz anderen Zielen dienen sollte.

Die raumakustische Forschung – die Beantwortung der Frage: Welche physikalischen Eigenschaften eines Raums bestimmen seine akustische Güte – war seinerzeit in eine Sackgasse geraten. Für die akustische Güte eines Theaters oder eines Konzertsals ist allein die „Hörsamkeit“ dieses Raums bestimmend; Zusammenhänge zwischen Hörsamkeit und physikalischen Parametern eines Raums lassen sich folglich nur über vergleichende Gütebeurteilungen von Theatern und Konzertsälen gewinnen. Diese Vergleiche sind jedoch sehr unsicher, es seien nur wenige Gründe genannt:

- Zwischen den Vergleichen verstreicht häufig eine Zeit von Wochen oder gar Jahren.
- Stück und Interpreten sind nur in seltenen Fällen dieselben.
- Optische Eindrücke sind dominant gegenüber akustischen Eindrücken.

All diese Schwierigkeiten könnte man umgehen – so das Kalkül der Wissenschaftler – wenn es gelänge, eine Möglichkeit zu finden, Höreindrücke, die ein Hörer an einem bestimmten Platz in einem Raum gewinnen kann, zu beliebiger Zeit an beliebigem Ort zu reproduzieren.

Geht man davon aus, daß der Höreindruck allein davon bestimmt ist, welche Schallsignale (genauer: Zeitver-

läufe des Schalldrucks) an den Trommelfellen des Hörenden auftreten, so muß die Aufgabe lösbar sein, wenn an einer genügend genauen Nachbildung eines menschlichen Kopfes einschließlich Trommelfellen die Signale abgenommen, in elektrische verwandelt, gespeichert und schließlich an den Trommelfellen eines Hörers in die ursprünglichen Schallsignale zurückgewandelt werden.

Dieser Aufgabe widmeten sich zu gleicher Zeit zwei Gruppen von Wissenschaftlern am 3. Physikalischen Institut der Universität Göttingen und am Heinrich-Hertz-Institut in Berlin; beide Entwicklungen waren etwa gleichzeitig abgeschlossen.

Allerdings ist der Gedanke der „kopfbezogenen“ elektroakustischen Übertragung so alt wie die Elektroakustik selbst, nur waren diese früheren Versuche aus zwei Gründen zum Scheitern verurteilt:

1. Unsere Kenntnisse über das Hören waren noch recht unvollständig; so glaubte man z. B., daß die Ohrmuscheln für das Hören ohne Bedeutung seien, ein Relikt aus der Evolution des Menschen.
2. Der Entwicklungsstand der Elektroakustik insgesamt war ungenügend; für die kopfbezogene Stereophonie ist aber eine hohe Übertragungsgüte Voraussetzung.

Der Kunstkopf geriet in Vergessenheit, die elektroakustische Übertragung im Rundfunk und bei der Schallplatte nahm eine Entwicklung, die im wesentlichen geprägt war durch die sich langsam verbessernde technische Qualität. Die Aufnahmepraxis wurde bestimmt durch technische Zwänge; das äußerte sich insbesondere darin, daß das oder die Mikrofone stets in der Nähe der Schallquelle angeordnet werden mußten. Auch bei Einführung der Stereophonie wurde dieses einmal „gewählte“ Prinzip beibehalten. Es wurde auch nach erheblichen technischen Fortschritten in der Güte etwa der Mikrofone oder der Übertragungswege (UKW) nicht mehr in Frage gestellt.

Dieses Prinzip läßt sich mit wenigen Worten etwa so kennzeichnen:

Aufnahmемikrofone im Nahfeld der Schallquellen versorgen Lautsprecher im Abhörraum; dabei sind die Lautsprecher die Repräsentanten der Schallquellen, der Originalraum wird weitgehend ausgeklammert.

Es wurde immer mehr verfeinert und schließlich auch sozusagen ideologisch untermauert: Die Aufgabe der elektroakustischen Übertragung ist nicht mehr die möglichst naturgetreue Abbildung des Höreindrucks, den ein Hörer z. B. in einem Konzertsaal gewinnt. Die „Übertragung“ dient dem Ziel, dem Hörer ein möglichst klares und „präzises“ Bild der Partitur zu vermitteln. Der Originalraum wird dabei weitgehend eliminiert, ebenso meist die Aufstellung des Orchesters und in aller Regel die Lautstärkeverhältnisse der Schallquellen untereinander.

Nicht alle Hörer haben dies mit vieler Mühe und großem Aufwand erreichte Ergebnis honoriert; viele wünschen sich nach wie vor „nur“ eine Übertragung, die dem Konzertsaalserlebnis möglichst nahe kommt. Diesem Bedürfnis wird eine kopfbezogene Übertragung ohne jedes Beiwerk, wie sie für raumakustische Forschung gefordert war, wahrscheinlich am besten gerecht. Der eigentliche Erfolg des Kunstkopfes bei seiner Vorstellung im Rundfunk 1973 war nun allerdings nicht die Konzertsaalübertragung, sondern das Hörspiel; die nahezu vollständige Abbildung aller Raumrichtungen, besonders aber die Fä-

<sup>1</sup> Prof. Dr. Georg Plenge ist Leiter des Fachbereichs Studiotechnik Hörfunk im Institut für Rundfunktechnik, München.

higkeit des Kunstkopfes, Entfernungen abzubilden, eröffnete eine völlig neue Dimension.

Grundsätzlich erfordert die kopfbezogene Aufnahme auch eine kopfbezogene Wiedergabe, also die Verwendung von Kopfhörern. Kopfhörer haben gegenüber Lautsprechern eine ganze Reihe von Vorteilen:

- sie sind bei vergleichbarer Übertragungsgüte wesentlich billiger als Lautsprecher,
- sie benötigen keine aufwendigen Leistungsverstärker,
- sie ermöglichen freie Wahl der Lautstärke bzw. bei kopfbezogener Stereophonie Einstellen der Originallautstärke,
- bei kopfbezogener Stereophonie entfällt auch der sonst auftretende unangenehme Effekt der Im-Kopf-Lokalisation.

Trotzdem gibt es „Kopfhörergegner“, sicher aus verständlichen Gründen:

- Über lange Zeit, z. B. für die Dauer eines Konzertes, kann das Kopfhörertragen sehr lästig werden.
- Die Kommunikation mit anderen im gleichen Raum ist erschwert.
- Die Beschallung des Körpers des Hörenden entfällt; bei sehr großen Schallpegeln ist dies spürbar.
- Bei Drehungen des Kopfes des Hörenden wandert das Schallbild mit.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, den Höreindruck, den man beim Hören über Kopfhörer gewinnt, auch mit Lautsprechern zu erzeugen. Unter Laborbedingungen gelingt dies frappierend gut, Voraussetzung sind ein reflexionsarmer Raum und ein stillgehaltener Kopf an einem genau vorherbestimmten Ort im Raum; für das alltägliche Hören zu Haus nicht erfüllbare und unzumutbare Bedingungen.

Für den Rundfunk wurde alsbald die Forderung erhoben: Wenn sich der „Kunstkopf“effekt mit Lautsprechern unter Normalbedingungen nicht erzeugen läßt, so müssen doch kopfbezogene Aufnahmen lautsprecherkompatibel sein; mit anderen Worten, wenn auch kopfbezogene Aufnahmen über Lautsprecher etwas anders klingen als herkömmliche intensitätsstereofone Aufnahmen, so sollen sie ihnen doch qualitativ ebenbürtig sein. Diese Forderung ist sinnvoll, wenn man bedenkt, daß insbesondere Musikaufnahmen in kopfbezogener Stereophonie nicht nur für den Kreis von Hörern bestimmt sein sollen, der bereit ist, über Kopfhörer abzuhören. Daraus ergibt sich nun sogleich eine weitere Forderung: Die Lautsprecherkompatibilität muß erreicht werden, **ohne** daß zusätzliche Einrichtungen beim Hörer erforderlich werden. Das gleiche gilt aber auch für das Abhören über Kopfhörer, folglich muß das von den Rundfunkanstalten ausgestrahlte Signal so beschaffen sein, daß es beiden Forderungen gleichzeitig genügt.

Das Institut für Rundfunktechnik hatte also in seinem Bemühen, die kopfbezogene Stereophonie rundfunktauglich zu machen, zwei Aufgaben zu lösen:

1. Der Kunstkopf mußte im Hinblick auf Klangfarben- und Richtungstreue entscheidend verbessert werden.
2. Die Frage der Lautsprecherkompatibilität war mit den geschilderten Randbedingungen zu lösen.

Die Verbesserung des in den Rundfunkanstalten bisher meist verwendeten Kunstkopfes KU 80 war bisher daran gescheitert, daß angenommen wurde, die Impedanz des Trommelfelles habe einen Einfluß auf die Richtcharakteristik des Ohres. Die Impedanznachbildung ist außerordentlich schwierig und ein großes Handicap. Es wurde darum zunächst überprüft, ob an dieser Forderung tatsächlich festgehalten werden müsse. Das Ergebnis ist: Der Einfluß ist zwar vorhanden, aber so gering, daß er vernachlässigt werden kann.

Mit dieser „Marscherleichterung“ konnte nun versucht werden, einen Kunstkopf mit genauer Nachbildung einer typischen Richtcharakteristik zu bauen. Hierüber berichten H. Hudde und J. Schröter in ihrer Arbeit „Verbesserungen am Neumann-Kunstkopfsystem“. Darüber hinaus konnte die Entzerrung der Kunstkopfsignale, die im Hinblick auf die Wiedergabe über Kopfhörer oder Lautsprecher erforderlich ist, schon **vor** der Mikrofonmembran erfolgen. Es wurde somit eine Mikrofonankopplung entwickelt, die nicht nur die unverzerrte Aufnahme des Schallsignals mit dem bewährten Studiomikrofon des alten Kopfes ermöglicht, sondern die auch die gewünschte Entzerrung erzielt und zusätzlich den allgemeinen Forderungen des Rundfunks an technische Qualität, Betriebssicherheit usw. entspricht. Das Ergebnis ist niedergelegt im Aufsatz von H. Wollherr: „Mikrofonankopplung an das Außenohr eines neuen Kunstkopfes“.

Da die Wahl der Mikrofoneinspracheöffnung in der Nähe des Beginns des Ohrkanals sowie das Weglassen des größten Teils des Ohrkanals in jedem Fall eine Entzerrung erforderlich macht – sei es rein akustisch oder elektrisch –, war zu überprüfen, ob diese Entzerrung nicht gleichzeitig eine Anpassung an geeignete Kopfhörer übernehmen kann. Die Arbeiten dazu haben ergeben, daß es nicht sinnvoll ist, für die Wiedergabe kopfbezogener stereofoner Signale bei sogenannten freifeldentzerrten Kopfhörern zu bleiben. Darüber hinaus ergab sich, daß grundsätzlich die Freifeldentzerrung, die gedacht war für die Wiedergabe monofoner oder intensitätsstereofoner Signale, auf einem falschen theoretischen Ansatz beruht. Das Ergebnis der umfangreichen theoretischen Arbeiten, über die in dem Aufsatz von G. Theile: „Zur Theorie der optimalen Wiedergabe von stereofonen Signalen über Lautsprecher und Kopfhörer“ berichtet wird, ist vielmehr, daß grundsätzlich eine Diffusfeldentzerrung an Stelle einer Freifeldentzerrung zu wählen ist.

Damit war auch der entscheidende Schritt für das Erreichen der Lautsprecherkompatibilität getan. Über die beiden Teilaspekte der Kompatibilität berichten die Arbeiten von G. Theile: „Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsabbildung bzw. Die Klangfarbe“.

Das Institut für Rundfunktechnik hofft, daß mit diesem Ergebnis die Voraussetzungen geschaffen sind, den Einsatz der kopfbezogenen Stereophonie im Rundfunk in größerem Maße als bisher zu ermöglichen, den Kunstkopf aus dem Experimentierstadium zu befreien. Der praktische Einsatz in den Funkhäusern wird sicher eine Reihe weiterer Fragen aufwerfen. Einige sind bereits jetzt zu erkennen:

1. Wo ist der optimale Standort für den Kunstkopf? Diese Frage ist zu klären sowohl in bezug auf unterschiedliche Programmarten (Hörspiel, Konzert usw.) wie auch unter ständiger Beachtung der Lautsprecherkompatibilität.
2. Ist unter Umständen nicht doch eine Korrektur der gegebenen Lautstärkeverhältnisse mehrerer Schallquellen zueinander möglich? Lassen sich „Stützkunstköpfe“ analog zu Stützmikrofonen einsetzen? Wenn ja, wie?
3. Welche Randbedingungen sind für Schnitte einzuhalten?
4. Wie kann sichergestellt werden, daß der Hörer zu Haus mit der richtigen, der Originallautstärke abhört? Kommen dafür Zusatzsignale in Betracht? Wie können diese dem Hörer übermittelt werden?

Das IRT wird sich bemühen, auch diese Fragen (so weit sie nicht rein betriebstechnische Fragen sind, wie beispielsweise die Standortwahl) zu lösen.

## INHALTSVERZEICHNIS:

|                                                                                                                                          |    |                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Vorwort .....                                                                                                                            | 3  | Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe:<br>Die Klangfarbe ..... | 18 |
| Georg Plenge                                                                                                                             |    | Günther Theile                                                                                                                   |    |
| Verbesserungen am Neumann-Kunstkopfsystem .....                                                                                          | 5  | Mikrofonankopplung an das Außenohr eines neuen Kunstkopfes .....                                                                 | 27 |
| Herbert Hudde, Jürgen Schröter                                                                                                           |    | Horst Wollherr                                                                                                                   |    |
| Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe:<br>Die Richtungsabbildung ..... | 11 | Zur Theorie der optimalen Wiedergabe stereofoner Signale über Lautsprecher und Kopfhörer .....                                   | 32 |
| Günther Theile                                                                                                                           |    | Günther Theile                                                                                                                   |    |

VERBESSERUNGEN AM NEUMANN-KUNSTKOPFSYSTEM<sup>1</sup>VON HERBERT HUDDE UND JÜRGEN SCHRÖTER<sup>2</sup>

Manuskript eingegangen am 6. August 1980

Kopfbezogene Stereophonie

## Zusammenfassung

Es werden die Grundüberlegungen dargelegt, die zur Konzeption des neuen Kunstkopfsystems führten. Wegen seiner weiten Verbreitung wurde als Ausgangspunkt der Neumann-Kunstkopf KU 80 verwendet. Die vorgenommenen Änderungen, deren Kern in einer elektrischen Entzerrung der Mikrofonsignale besteht, bleiben in einem Rahmen, der ein nachträgliches Umrüsten des KU 80 ermöglicht. Die Optimierung der neuen Komponenten wird beschrieben.

## Summary Improvements in the Neumann artificial-head system

The article discusses the fundamental considerations that led to the design of an improved artificial-head system. Because it is already in widespread use, the Neumann artificial head type KU 80 was used as the starting point. The modifications undertaken, whose nucleus consists of the electrical balancing of the microphone signals, remain within limits that render the subsequent conversion of the KU 80 artificial head possible. The article describes the optimising of the new components.

## Sommaire Améliorations apportées au système de tête artificielle de Neumann

L'article examine les considérations de base qui ont amené à concevoir un système de tête artificielle amélioré. Comme elle est déjà couramment utilisée, la tête artificielle du type KU 80 de Neumann a été prise comme point de départ. Les modifications entreprises, centrées sur un équilibrage électrique des signaux des microphones, restent dans des limites qui permettent la conversion ultérieure de la tête artificielle KU 80. L'article décrit la manière d'optimiser les nouveaux composants.

## 1. Einleitung

Die Einführung der kopfbezogenen Stereophonie im Hörrundfunk (Internationale Funkausstellung Berlin 1973) erbrachte zunächst vielversprechende Erfolge. Die Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen über Kopfhörer zeichnet sich gegenüber der Wiedergabe intensitätsstereofoner Aufnahmen über Lautsprecher durch eine deutlich verbesserte Wahrnehmbarkeit von Richtung und Entfernung der ursprünglichen

Schallquellen aus. Es treten jedoch einige Übertragungsfehler auf, deren Ursachen auch heute noch nicht vollständig bekannt sind. Dazu gehören:

1. Im-Kopf-Lokalisierung (IKL): die Entfernung der Hörereignisse wird, besonders für Schalleinfallrichtungen in der Medianebene, stark verringert. Eine Vielzahl von Hörern hat dabei den Eindruck, daß sich die Schallquelle sehr nahe am oder sogar im Kopf befindet.
2. Richtungsinverson: schräg oder genau vor dem Kunstkopf befindliche Schallquellen werden sehr häufig hinten geortet. Seltener ist auch das Gegenteil der Fall.
3. Elevation der Hörereignisse gegenüber den Schalleinfallrichtungen: unnatürliche Anhebung der scheinbaren Schallquelle. Sie tritt besonders für vordere Schalleinfallrichtungen auf.

<sup>1</sup> Nach dem Manuskript eines Vortrages, gehalten auf der 5. Fachtagung Hörrundfunk der Nachrichtentechnischen Gesellschaft (NTG) in Mannheim, 5. bis 7. März 1980.

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Herbert Hudde ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fernuniversität Hagen, Zentrum für Fernstudienentwicklung; Dipl.-Ing. Jürgen Schröter ist Wissenschaftlicher Assistent an der Ruhruniversität Bochum, Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Akustik.

4. Zu starke Auslenkung der Hörereignisse aus der Medianebene bei kleinen seitlichen Einfallswinkeln.

Den eindrucksvollen Beweis, daß sich die Häufigkeit der Übertragungsfehler durch Verbesserungen am Kunstkopf reduzieren läßt, erbrachten Platte et al. mit der „Anordnung zur genauen Reproduktion von Ohrsignalen“ [1]. Sie verwendeten Versuchspersonen, um an ihnen über Sondenmikrofone „Kunstkopfsignale“ zu gewinnen. Die Vorne-Ortung konnte auf diese Weise wesentlich verbessert werden, auch dann, wenn Aufnahme- und Wiedergabever Versuchsperson nicht identisch waren.

Ein zusätzlicher Grund, daß die Kunstkopftechnik beim Rundfunk bis heute noch keine weitere Verbreitung gefunden hat, muß in der als unbefriedigend empfundenen Lautsprecherwiedergabe von Kunstkopfsignalen gesehen werden (Frage der Kompatibilität zur Intensitätsstereofonie) [2, 3]. Herkömmliche Kunstköpfe besitzen kein frequenzunabhängiges Freifeldübertragungsmaß, so daß hörbare Klangverfärbungen auftreten, wenn ihre Signale ohne Entzerrung über Lautsprecher wiedergegeben werden. Hinzu kommt noch, daß die bei der Aufnahme vorhandenen Laufzeitunterschiede bei Lautsprecherwiedergabe durch Überlagerung beider Kanäle in jedem Ohr des Zuhörers („Übersprechen“) kammfilterartige Verzerrungen hervorrufen, die sich nur durch aufwendige Kompensationsschaltungen reduzieren lassen [4, 5], wobei eine genaue Kompensation nur im reflexionsarmen Raum bei exakter Einhaltung einer vorgeschriebenen Kopfposition möglich ist.

Ansatzpunkt konkreter Verbesserungsmaßnahmen im obigen Sinne war das Kunstkopfsystem KU 80 der Firma Neumann. Es wurden folgende Ziele angestrebt:

- a) die richtungsabhängigen Übertragungseigenschaften des System besser an die einer „typischen“ Versuchsperson anzupassen, um die bekannten Lokalisationsfehler zu vermeiden,
- b) eine akzeptable Klangqualität der Lautsprecherwiedergabe bei Stereostandaraufstellung ohne „Zusatzelektronik“ zu erreichen und
- c) für Studiozwecke ausreichende Rauscheigenschaften sicherzustellen.

## 2. Verbessertes Konzept für einen Kunstkopf

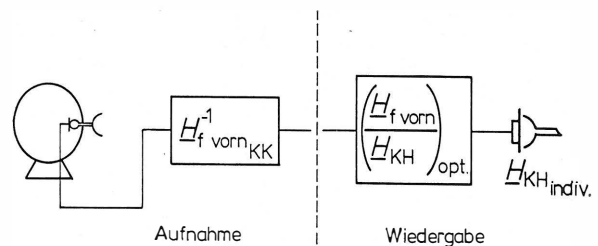
Eine im strengen physikalischen Sinne „originalgetreue“ elektroakustische Übertragung ist, bei vertretbarem Aufwand, auch mit der Kunstkopftechnik nicht zu erreichen bzw. psychoakustisch auch nicht sinnvoll. Sie wird schon durch die vielfältigen interindividuellen Unterschiede verhindert, deren Erfassung letztlich darauf hinauslaufen würde, jedem Hörer seinen Kunstkopf zur Verfügung zu stellen. Für die Verbesserung des KU 80 wurde vielmehr angestrebt, ein „typisches“ Übertragungsverhalten des Kunstkopfsystems einzustellen, um bei der Mehrzahl der Hörer befriedigende Ergebnisse zu erhalten. Die dafür vorzuziehenden Eigenschaften wurden zu diesem Zweck aus einer Vielzahl von Messungen an Versuchspersonen gewonnen, auf die später noch eingegangen wird.

Ansatzpunkte zur Verbesserung des Neumann-Kopfes im Sinne des Realisierungsziels a) und c) waren:

1. die Erkenntnis, daß die Richtcharakteristik des Ohres nicht vom Ohrkanal und nicht von der Trommelfellimpedanz abhängt,
2. die Konstruktion einer besseren Nachbildung der Ohrmuschel in Gestalt und Lage am Kopf.

Die durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen beziehen sich im ersten Fall auf den Teil der Übertragungskette Schallfeld – Trommelfell, der von der Schalleinfallrichtung unabhängig ist, und im zweiten Fall auf die Richtcharakteristik des Ohres. Die Schnittstelle zwischen beiden Teilen befindet sich am Eingang des Ohrkanals. Tiefer im Ohrkanal sind nur noch ebene Wellen ausbreitungsfähig, wobei das Verhältnis der rücklaufenden zu den einlaufenden Wellen nur vom Ohrkanalabschluß und der speziellen Ohrkanalquerschnittsfunktion bestimmt wird [6]. Das Vorliegen ebener Wellen ist der Grund dafür, daß man in der Praxis auf eine mechanische Nachbildung des Gehörgangs einschließlich des Trommelfells verzichten kann, wie in [7] theoretisch und meßtechnisch nachgewiesen wurde. Die Richtcharakteristik des Ohres wird davon bei normalen Beschallungsfällen nicht betroffen. Dadurch ist es möglich, das zu realisierende Übertragungsverhalten des gesamten Systems Kunstkopf – Übertragungsstrecke – Wiedergabewandler so aufzuspalten, daß optimale Eigenschaften gemäß den Zielvorgaben erreicht werden. Die Vielfältigkeit der möglichen Realisierungen wurde in [7] zunächst dazu ausgenutzt, auf eine bestimmte Bezugsebene im Ohrkanal zu entzerren. Wegen der Erkenntnis, daß herkömmliche Kopfhörer bei Anregung durch ein frequenzunabhängiges Spektrum der Eingangsspannung kein frequenzunabhängiges Spektrum des Schalldrucks in irgendeiner Querschnittsebene des Ohrkanals erzeugen, sondern vielmehr in jedem Aufpunkt des Ohrkanals näherungsweise den Schalldruckfrequenzgang reproduzieren, den eine vor der Versuchsperson befindliche Schallquelle frequenzunabhängigen Spektrums im gleichen Aufpunkt erzeugen würde (Freifeldentzerrung des Kopfhörers), sollte dies bei der Realisierung berücksichtigt werden. Dadurch wird der notwendige Entzerreraufwand geringer.

Das Gesamtkonzept des für „vorn“ freifeldentzerrten Kunstkopfes ist in **Bild 1** dargestellt [8]. Das Mikrofonsignal durchläuft auf der Aufnahmeseite ein Entzerrfilter, welches die vom Kunstkopf her-



**Bild 1**  
Konzept mit freifeldentzerrtem Kunstkopf und freifeldentzerrtem Kopfhörer



vorgerufene frequenzmäßig unterschiedliche Bewertung für vorne liegende Schallquellen rückgängig macht (Freifeldentzerrung des Kunstkopfes). Die für diese Richtung nach dem Filter vorliegenden Signale sind daher für eine Lautsprecherwiedergabe besser geeignet als die ursprünglichen Mikrofonsignale (Ziel b). Für die Wiedergabe über Kopfhörer muß ein Entzerrfilter vorgeschaltet werden, welches im Idealfall die individuelle Ohrbewertung für die Bezugsrichtung „vorne“ den Signalen wieder aufprägt (Freifeldentzerrung des Kopfhörers).

Für die Realisierung des Konzeptes wurde das folgende Arbeitsprogramm durchgeführt:

1. Überprüfung der Geometriedaten der Kopfnachbildung,
2. Messung des richtungsabhängigen Teils der Außenohrübertragungsfunktionen an Versuchspersonen nach Pegel und Gruppenlaufzeit,
3. Ermittlung einer „typischen“ Versuchsperson und Abguß ihrer Ohrmuscheln,
4. Suche nach dem optimalen Ort für die beiden Ohrmuscheln am Kopf,
5. Suche nach dem optimalen Mikrofonort bzw. nach dem optimalen künstlichen Gehörgang,
6. elektrische Entzerrung der realisierten Kopfnachbildung auf ein „glattes Spektrum“ für die Bezugsrichtung „vorne“,
7. Messung der nötigen Entzerrerübertragungsfunktion für einen vorgegebenen näherungsweise freifeldentzerrten Kopfhörer an mehreren Versuchspersonen,
8. Realisierung einer optimalen Kopfhörerentzerrung.

Recht einfach war die Überprüfung der Geometriedaten der Kopfnachbildung, bei der auf die ausführlichen Daten von Burkhard und Sachs [9] zurückgegriffen werden konnte. Bis auf einen etwas zu flachen Hinterkopf entsprechen die äußeren Abmessungen des KU 80 normalen Werten. Lage und Feinstruktur der Ohrmuscheln sind dagegen schlecht reproduziert.

Die Darstellung aller weiteren Einzelschnitte erfordert zunächst eine Vorstellung von der eingesetzten Meßtechnik, die daher als nächstes beschrieben werden soll.

### 3. Meßtechnik

Die Aufgabenstellung, ein gegebenes Kunstkopfsystem in seinen Leistungen zu verbessern, setzt voraus, daß die nötigen meßtechnischen Mittel zur Verfügung stehen. Zwar bezieht sich die angestrebte Verbesserung letztlich auf psychoakustische Größen wie Richtungsabbildung und Klangfarbentreue bei Kopfhörerwiedergabe und auf eine akzeptable Lautsprecherwiedergabe, die dazu eingesetzte Meßtechnik erstreckte sich in der Konstruktionsphase jedoch nur auf physikalische Größen. Ein Hauptteil der durchgeführten Messungen bestand dabei in der Erstellung eines Kataloges von Außenohrübertragungsfunktionen [10]. Es wurden an zehn Versuchspersonen beidohrig für 84 Richtungen des oberen Halbraumes monaurale Übertragungsfunktionen bestimmt. Für die

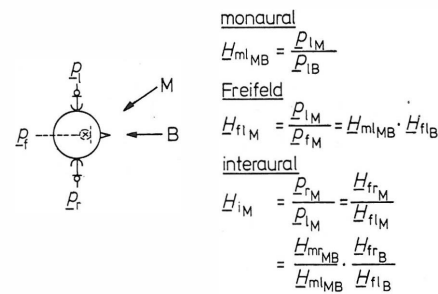


Bild 2

Zur Definition der verschiedenen Richtungsübertragungsfunktionen des Außenohres

Bezugsrichtung „vorne“ wurden an 17 Versuchspersonen die Freifeldübertragungsfunktionen beider Ohren gemessen. Definition und Bedeutung der verschiedenen Arten von Außenohrübertragungsfunktionen erklärt Bild 2 [11, 12]. Im Rahmen dieser Arbeit konnte auf ein rechnergestütztes Meßsystem [13, 14] zurückgegriffen werden.

Die Messungen der Außenohrübertragungsfunktionen fanden im reflexionsarmen Raum statt. Die jeweilige Versuchsperson saß dabei auf einem in 15°-Schritten rastbaren Drehstuhl, wobei der Elevationswinkel durch die Anwahl eines von elf Lautsprechern auf einem 100°-Kreissegment eingestellt wurde und der Abstand aller Lautsprecher vom Kopfmittelpunkt 2,5 m betrug. Der benutzte Meßaufbau ist aus Bild 3 ersichtlich. Da die Richtcharakteristik des Ohres von der Eingangsimpedanz des Ohrkanals unabhängig ist, konnten die Autoren bei der Messung der monauralen Übertragungsfunktionen relativ große Elektretkapseln (KNOWLES BT 1759) verwenden. Aus dem gleichen Grund war eine genaue Positionierung im Ohr überflüssig. Achten mußte man allerdings darauf, daß sich die Mikrofone zwischen der Messung der Nennerfunktion (Bezugsrichtung vorne) und der Zählerfunktion (siehe Bild 2) nicht verschoben. Dies wurde durch Befestigung an Schaumstoff-Gehörschutzstöpseln erreicht, die sich kurz nach dem Einsetzen im Gehörgang selbst „verkeilten“. Der Reproduktionsfehler betrug damit für keine Frequenz mehr als 3 dB. Er konnte auf eine ungenaue geometrische Positionierung des Kopfes zurückgeführt werden. Wie Bild 4 zeigt, sind aber die interindividuellen Unterschiede größer, so daß zusätzliche Maßnahmen zur Kopffixierung nicht sinnvoll erschienen. Auffällig ist in Bild 4 die Verschiebung eines schmalbandigen An-

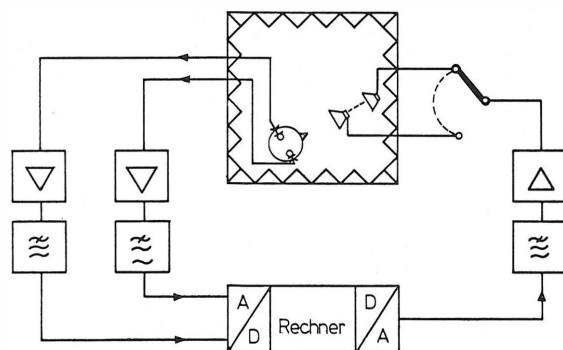
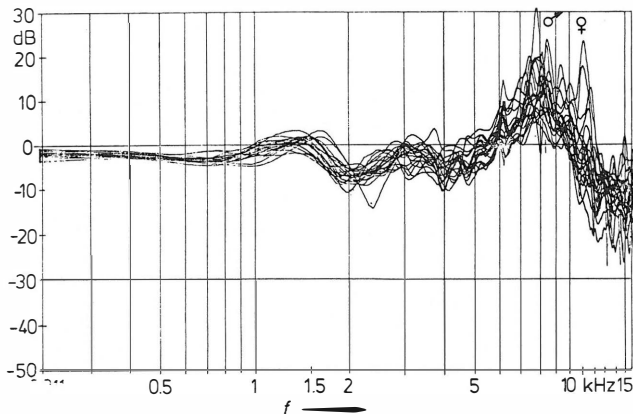


Bild 3

Schema der Messung von Außenohrübertragungsfunktionen



**Bild 4**  
Individuelle monaurale Übertragungsfunktionen  
Schalleinfall von oben, bezogen auf vorne  
10 Versuchspersonen, beide Ohren

hebungsbereiches von 8 auf 11 kHz für zwei der drei weiblichen Versuchspersonen.

#### 4. Meßdatenverarbeitung

Die individuellen monauralen Übertragungsfunktionen wurden nach Abschluß der Messungen einem Auswerteverfahren unterworfen, um die „typische“ Versuchsperson herauszufinden. Als „typisch“ wird hierbei die Versuchsperson bezeichnet, deren Meßdatenabweichung von allen anderen Versuchspersonen im Durchschnitt aller Richtungen minimal ist.

Zur Diskussion stand zunächst die Definition eines Abstandsmaßes für die monauralen Übertragungsfunktionen zweier Versuchspersonen. Als Vergleichsgrößen wurden dazu der Pegelfrequenzgang und der abgespaltene Allpaßgruppenlaufzeitverlauf verwendet. Beide sind systemtheoretisch unabhängig. In letzterer ist die richtungsabhängige Grundlaufzeit enthalten. Nur für Frequenzen über 6 kHz ergaben sich signifikante frequenzabhängige Allpaßanteile. Um eine psychoakustisch sicher falsche Überbetonung der hohen Frequenzen zu vermeiden, wurden Abweichungen zunächst bezüglich der Anzahl der Spektrallinien innerhalb einer Frequenzgruppe [15] gewichtet. Weiterhin wurde postuliert, daß sich Abweichungen in Frequenzbereichen und für Richtungen, für die starke Streuungen zwischen den Versuchspersonen auftraten, nicht so stark auf den Fehler auswirken sollten wie dort, wo kleine Streuungen die Meßwerte absicherten. Plausibler Grund für diese Wichtung ist die Annahme, daß es sich wenig lohnt, einen vorgegebenen Kurvenverlauf zu reproduzieren, wenn starke individuell verschiedene Strukturen vorliegen.

Die Darstellung der mathematischen Ableitung würde an dieser Stelle zu weit führen. Statt dessen seien hier gleich die Ergebnisse in **Bild 5** wiedergegeben. Hier ist der Verlauf des relativen Pegelfehlermaßes der monauralen Übertragungsfunktionen für den Originalkunstkopf und für die überarbeitete Version über die 84 Richtungen aufgetragen, bezogen auf die „typische“ Versuchsperson. Zusätzlich ist zum Vergleich der Mittelwert der Fehlermaße aller anderen Versuchspersonen eingezeichnet. Die Abszisse ist wegen der Übersichtlichkeit nur in Abschnitte kon-

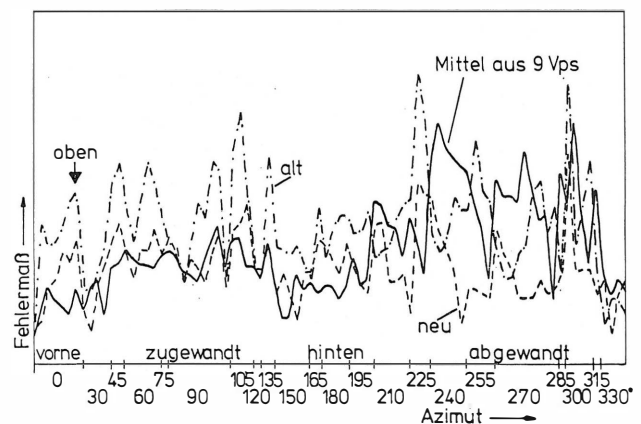
stanten Einfallswinkels in der Horizontalebene unterteilt. Innerhalb eines Abschnittes variiert der Elevationswinkel.

Global nähert die überarbeitete Version des Kunstkopfes den Katalog der monauralen Übertragungsfunktionen der typischen Versuchsperson (von der auch die Ohren abgegossen wurden) besser an als der KU 80 im Originalzustand. Im Winkelbereich zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  (direkte Beschallung des Ohres) konnten Verbesserungen erzielt werden, die sich sicherlich besonders für Richtungen in der Medianebene bemerkbar machen.

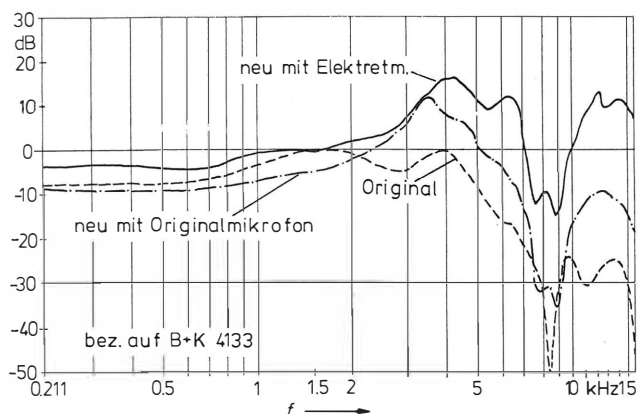
#### 5. Aufbau des Kunstkopfes

Bei allen durchgeführten Veränderungen am Neumann-Kunstkopf legten die Autoren Wert darauf, möglichst viele Teile des Originalkopfes weiterzubenutzen. Nach Abguß der Ohrmuscheln der „typischen“ Versuchsperson wurde versucht, im Sinne des Fehlermaßes aus 4. die günstigste Position der Ohrmuscheln am Kopf ohne Modifikation sonstiger Teile zu finden. Ein Optimum konnte für eine gegenüber der Originalanordnung nach hinten verschobene Position gefunden werden (vergleiche [16]). Danach wurden neue Ohrmuscheleinsätze hergestellt.

Die Originalmikrofonanordnung erwies sich für die elektrische Entzerrung wegen eines starken Höhenabfalls als völlig ungeeignet. Da das Prinzip des elektrisch entzerrten Kunstkopfes hinsichtlich der Ausgestaltung des Ohrkanals und der Abschlußimpedanz den nötigen Realisierungsspielraum bietet, wurde zunächst versucht, das Übertragungsmaß des Kopfes für hohe Frequenzen durch eine drastische Verkürzung des Ohrkanals zu verbessern. Die Anordnung der Neumann-Mikrofone am Ohrkanaleingang brachte zwar einen gewissen Gewinn, sie konnte aber letztlich immer noch nicht befriedigen, da ohne Änderungen am Mikrofon selbst ein unvermeidliches Volumen zwischen Mikrofonmembran und Concha-ankopplung stets zu einer Absenkung der hochfrequenten Anteile des Signalspektrums führt. Danach wurde versucht, mit dem KNOWLES BT 1759 durch Variation der Gehörgangslänge die Freifeldübertragungsfunktionen schon weitestgehend zu entzerren. Die kleinste Dynamik des Dämpfungsverlaufs zeigte



**Bild 5**  
Fehlermaß des Pegels für 84 Richtungen



**Bild 6**  
Freifeldübertragungsfunktionen  
bei verschiedenen Modifikationen des Originals

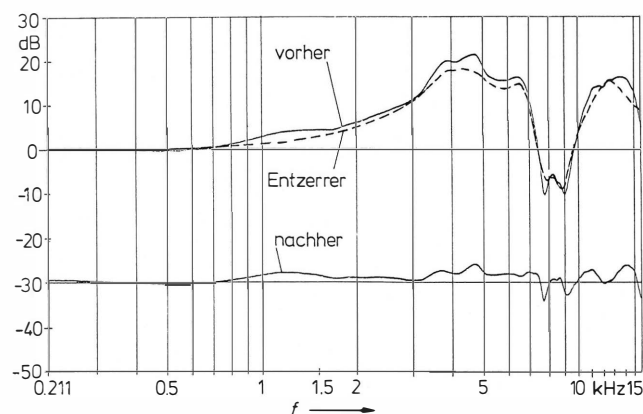
sich allerdings bei der kürzesten Länge des künstlichen Gehörgangs.

Die KNOWLES-Mikrofone besitzen zwar außerhalb des Kunstkopfes einen um etwa 3 dB schlechteren Rauschabstand als die Originalmikrofone, dieser Nachteil wird im eingebauten Zustand aber bei weitem durch die verbesserte Empfindlichkeit für hohe Frequenzen ausgeglichen.

Die angesprochenen Aspekte sind in **Bild 6** verdeutlicht. **Bild 7** gibt die Freifeldübertragungsfunktionen ohne und mit nachgeschaltetem passiven RLC-Filter an. Die verbleibende Pegelschwankung beträgt  $\pm 4$  dB.

## 6. Realisierung der Wiedergabeseite

Für die Bewertung der Verbesserungen des Kunstkopfes mußte das in **Bild 1** angegebene Kopfhörerfilter aufgebaut werden. Zunächst wurden an 10 Versuchspersonen mit Hilfe von neukonzipierten Sondenmikrofonen auf der Basis der KNOWLES-EA-1842-Elektretkapsel die individuellen Entzerrerübertragungsfunktionen bestimmt. Diese ergibt sich als komplexer Quotient aus der individuellen Freifeldübertragungsfunktion  $H_{f \text{ vorn}}$  und der normierten (dimensionslosen) Kopfhörerübertragungsfunktion  $H_{KH}$  des verwendeten Sennheiser HD 414. **Bild 8** zeigt die

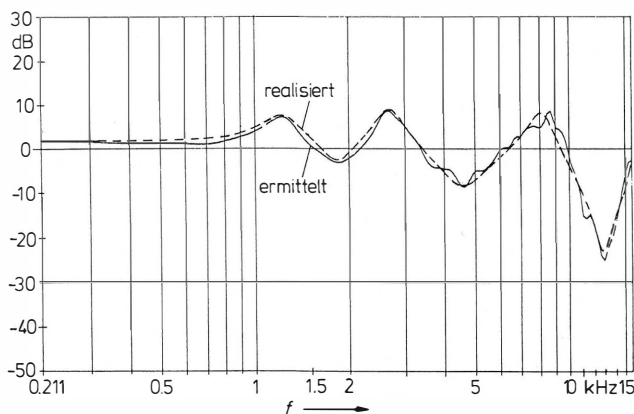


**Bild 7**  
Freifeldübertragungsfunktion (vorne)  
des verbesserten Neumann-Kunstkopfes

ermittelte und die realisierte Filterübertragungsfunktion.

## 7. Erfahrungen und Vorschläge

Durch die Überarbeitung des bestehenden Kunstkopfsystems KU 80 wurden einige Konstruktionsmängel der Originalversion behoben. So konnte das Übertragungsverhalten des Systems für höhere Frequenzen und die Richtcharakteristik der Ohren entscheidend verbessert werden. Damit ist auf der Aufnahmeseite ein ausreichender Stand der Technik erreicht. Lokalisationsfehler konnten, wie erste noch nicht abgeschlossene Hörversuche belegen, gegenüber



**Bild 8**  
Dämpfungsverlauf des Kopfhörerentzerrers (HD 414)

dem Original spürbar reduziert werden. Weitere Verbesserungen sind auf der Wiedergabeseite nur noch durch Individualanpassung (individuelle Entzerrung) zu erreichen. Für kommerzielle Anwendungen sollten neue Ohreinsätze entwickelt werden, die die Freifeldentzerrung des Kopfes soweit wie möglich durch mechano-akustische Abstimmung bewerkstelligen. Vom Gebrauch des Kunstkopfes auf dem Transportkasten (Oberkörpersimulation) ist wegen der damit verbundenen kammerfilterartigen Verzerrungen durch zu starke „Schulterreflexionen“ dringend abzuraten.

Die Autoren danken, auch im Namen des Lehrstuhlinhabers Prof. Dr.-Ing. J. Blauert, dem Institut für Rundfunktechnik in München für die großzügige Förderung der durchgeführten Arbeiten.

## SCHRIFTTUM

- [1] Platte, H.-J.; Laws, P.; v. Hövel, H.: Anordnung zur genauen Reproduktion von Ohrsignalen. Fortschritte der Akustik. DAGA 75, Braunschweig. Physik Verlag, Weinheim 1975, S. 361 bis 363.
- [2] Plenge, G.: Probleme bei der Einführung der Kunstkopfstereofonie beim Hörrundfunk. Rundfunktech. Mitt. 22 (1978), S. 216 bis 218.
- [3] Theile, G.: Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsabbildung. Hörrundfunk 5. NTG-Fachberichte Bd. 72, S. 34 bis 43.
- [4] Damaske, P.; Mellert, V.: Ein Verfahren zur richtungstreuen Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher. Acustica 22 (1969/70), S. 153 bis 162.
- [5] Takahashi, N.; Toshinori, M.; Kosuda, Y.: Precision sound image localization technique utilizing multi-

- track tape masters. 59th Convention of the Audio Engineering Society, Hamburg 1978.
- [6] Hudde, H.: Messung der Trommelfellimpedanz des menschlichen Ohres bis 19 kHz. Dissertation. Ruhruniversität Bochum, 1980.
- [7] Hudde, H.; Schröter, J.: The equalization of artificial heads without exact replication of eardrum impedance. *Acustica* 44 (1980), S. 301 bis 307.
- [8] Platte, H.-J.; Laws, P.: Technische Probleme beim Einsatz kopfbezogener stereofoner Übertragungsverfahren. *Rundfunktech. Mitt.* 22 (1978), S. 22 bis 27.
- [9] Burkhard, M. D.; Sachs, R. M.: Anthropometric manikin for acoustic research. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 58 (1975), S. 214 bis 222.
- [10] Schröter, J.: Katalog von Außenohrübertragungsfunktionen. Ruhruniversität Bochum, 1980.
- [11] Blauert, J.: Räumliches Hören. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1974.
- [12] Platte, H.-J.: Zur Bedeutung der Außenohrübertragungsfunktionen für den Nachrichtenempfänger „menschliches Gehör“. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1979.
- [13] Schröter, J. Els, H.: Ein Programmsystem zur rechnergestützten Messung akustischer Übertragungsfunktionen und zur Synthese von Signalen für psychoakustische Untersuchungen. Ruhruniversität Bochum, 1979.
- [14] Hudde, H.: Ein neues System zur Erfassung breitbandiger akustischer Signale. *Fortschritte der Akustik. DAGA 78*, Bochum. VDE-Verlag, Berlin 1978, S. 593 bis 596.
- [15] Zwicker, E.; Feldtkeller, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.
- [16] Mellert, V.: Die Mikrofonanordnung beim Kunstkopfbau. *Rundfunktech. Mitt.* 22 (1978), S. 196 bis 198.



## ZUR KOMPATIBILITÄT VON KUNSTKOPFSIGNALEN MIT INTENSITÄTSSTEREOFONEN SIGNALEN BEI LAUTSPRECHERWIEDERGABE: DIE RICHTUNGSABBILDUNG<sup>1</sup>

VON GÜNTHER THEILE<sup>2</sup>

Manuskript eingegangen am 9. März 1981

Kopfbezogene Stereophonie

### Zusammenfassung

Für die Einführung der Kunstkopfsterophonie beim Hörrundfunk hat das sogenannte Kompatibilitätsproblem eine entscheidende Bedeutung. Die Forderung lautet: Bei Wiedergabe der Kunstkopfsignale über Lautsprecher müssen die Hörereigniseigenschaften bestimmten Anforderungen mindestens ebenso genügen, wie dies bei der Wiedergabe entsprechender intensitätsstereofoner Signale der Fall ist. Zwei grundsätzliche Fragen waren zunächst zu klären:

- Welche Kompatibilität ist bezüglich der Hörereignisrichtung erreichbar?
- Welche Kompatibilität ist bezüglich der Hörereignisklangfarbe erreichbar?

Der vorliegende Beitrag beschreibt Untersuchungen zur Hörereignisrichtung.

Abhängig von der Schalleinfallrichtung enthalten die Kunstkopfsignale gegenüber entsprechenden intensitätsstereofonen Signalen abweichende, frequenzabhängige Kanalpegeldifferenzen und zusätzliche Laufzeitdifferenzen. Die Wirkung dieser Signaleigenschaften bei der Wiedergabe über Lautsprecher in Stereo-Standardaufstellung wurde hinsichtlich Lokalisation und Lokalisationsunschärfe theoretisch und experimentell untersucht.

Es wird gezeigt, daß bei der Wiedergabe von Kunstkopfsignalen über Lautsprecher in Stereo-Standardanordnung „gemischte Stereophonie“ erfolgt, das heißt, die Richtung der Phantomschallquelle ergibt sich aus der Summe der Wirkung von Laufzeit- und Pegeldifferenz. Die von der Schallfeldüberlagerung unabhängige Zeit/Pegel-Äquivalenz ist mit einem „Assoziationsmodell“ erklärbar, nicht aber mit Summenlokalisation.

Ferner zeigen die Messungen, daß die Kunstkopfsignale den Schalleinfallsbereich von  $\pm 30^\circ$  etwa im Wiedergabebereich  $\pm 20^\circ$  und den gesamten Bereich von  $\pm 90^\circ$  im Bereich  $\pm 30^\circ$  abbilden; die zusätzlichen Laufzeitdifferenzen führen nicht zu einer wesentlich größeren Lokalisationsunschärfe als bei reiner Intensitätsstereophonie. Das Kunstkopfmikrofon erweist sich hinsichtlich der Richtungsabbildung als kompatibel mit Koinzidenzmikrofonen.

### Summary On the compatibility of artificial-head signals with intensity-stereophony signals for loudspeaker reproduction. The directional image

For the introduction of artificial-head stereophony in sound broadcasting, the so-called compatibility problem is of decisive importance. The requirement is as follows: when reproducing the artificial-head signals by means of loudspeakers, the quality of the perceived sound must satisfy certain requirements at least to the extent that this is the case in the reproduction of the corresponding intensity-stereophonic signals. To begin with, two basic questions had to be answered:

- What is the degree of compatibility that can be attained with regard to the direction of the perceived sound?
- What degree of compatibility can be achieved with regard to the tonal quality of the perceived sound?

The present contribution describes investigations relating to the direction of the perceived sound.

As a function of the direction of incidence of the sound, the artificial-head signals exhibit frequency-dependent channel-level differences and additional propagation-time differences, that are not the same as those of the corresponding intensity-stereophonic signals. The effect of those signal properties in the case of reproduction by means of loudspeakers installed in the standard arrangement for stereophony, was examined theoretically and experimentally as regards the localisation and localisation blurring.

It is shown that, on the reproduction of artificial-head signals by means of loudspeakers in the standard arrangement for stereophony, „mixed stereophony“ occurs, that is to say, the apparent direction of the sound-source results from the sum of the effects of the differences of propagation-time and level. The time/level equivalence, which is independent of the sound-field superimposition, may be explained by means of an association model, but not with sum localisation.

The measurements show, furthermore, that the artificial-head signals reproduce the sound-incidence range of about  $\pm 30^\circ$  within a reproduction range of  $\pm 20^\circ$  and the full range of  $\pm 90^\circ$  within a range of  $\pm 30^\circ$ ; the additional differences in propagation times do not give rise to any appreciably greater localisation blur than in the case of pure intensity stereophony. As regards the directional image, the artificial-head microphone proves to be compatible with coincidence microphones.

### Sommaire Compatibilité des signaux de tête artificielle et des signaux en stéréophonie d'intensité en cas de reproduction par haut-parleurs: l'image sonore directionnelle

Le problème de la compatibilité revêt une importance fondamentale pour l'introduction de la stéréophonie à tête artificielle en radiodiffusion sonore. En fait, il faut que lors de la reproduction par haut-parleurs de signaux captés au moyen d'une tête artificielle, le son reçu possède au moins certaines des caractéristiques que présente celui produit par des signaux correspondants en stéréophonie d'intensité. Deux questions essentielles se posent alors:

- quel degré de compatibilité peut-on atteindre en ce qui concerne la direction du son reçu?
- quel degré de compatibilité peut-on atteindre en ce qui concerne la tonalité du son reçu?

Le présent article décrit des recherches concernant la direction du son reçu.

En fonction de la direction d'incidence du son, les signaux de tête artificielle présentent par rapport aux signaux correspondants en stéréophonie d'intensité des différences de niveau des voies liées à la fréquence ainsi que des différences de temps de propagation. Les effets de ces caractéristiques en cas de reproduction

<sup>1</sup> Überarbeitete Fassung eines Vortrages, gehalten auf der 5. Fachtagung Hörrundfunk der Nachrichtentechnischen Gesellschaft (NTG) in Mannheim, 5. bis 7. März 1980.

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Günther Theile ist Leiter des Arbeitsbereiches Systeme der Ton-Aufnahme/Wiedergabe im Institut für Rundfunktechnik, München.

par haut-parleurs disposés pour une écoute stéréophonique normale ont fait l'objet d'études théoriques et d'essais pratiques concernant la localisation précise et les effets de flou.

On montre qu'en cas de reproduction de signaux de tête artificielle par des haut-parleurs disposés de façon classique, se produit un phénomène de stéréophonie mixte, c'est-à-dire que la direction apparente de la source sonore est le résultat de la somme des effets des différences de temps de propagation et de niveau. L'équivalence temps-niveau, qui est indépendante de la superposition du champ acoustique, peut être expliquée à l'aide d'un modèle d'association, mais la localisation ne résulte pas de leur somme.

Les résultats des mesures indiquent également que les signaux de tête artificielle reproduisent environ  $20^\circ$  pour un angle d'incidence acoustique de  $\pm 30^\circ$  et environ  $30^\circ$  pour un angle total de  $\pm 90^\circ$ ; les différences supplémentaires de temps de propagation n'entraînent pas une diminution importante de la précision de la localisation par rapport à une pure stéréophonie d'intensité. En ce qui concerne l'image directionnelle, le microphone de tête artificielle se révèle compatible avec des microphones à coïncidence.

## 1. Einleitung

Die Idee der Kunstkopfstereofonie ist so alt wie das Bestreben, Hörerlebnisse möglichst originalgetreu zu übermitteln. Es war naheliegend, die Ohrsignale mit zwei Mikrofonen nachzubilden und sie nach der Übertragung an den Ohren des Hörenden zu reproduzieren. Leider haben alle Versuche aus früherer Zeit zu enttäuschenden Ergebnissen geführt, weil wesentliche Erkenntnisse über die Phänomene beim räumlichen Hören noch nicht vorgelegen haben. Dazu zählt besonders der Nachweis, daß die Wirkung von Kopf und Ohrmuscheln im Schallfeld unerlässlich ist und sogar Feinheiten der geometrischen Abmessungen des Außenohres eine wichtige Rolle spielen [1], insbesondere für die Lokalisation von Hörereignissen außerhalb des Kopfes [2, 3]. Entsprechend diesen Erkenntnissen wurden verschiedene neue Kopfnachbildungen entwickelt, die zu wesentlich günstigeren Übertragungsergebnissen führten [4, 5, 6]. Es ist inzwischen erwiesen, daß alle anderen Übertragungsverfahren die räumlichen Eigenschaften von Hörereignissen nicht so genau reproduzieren können [7, 8]. In der Forschung wird deshalb die Kunstkopfstereofonie mit großem Erfolg eingesetzt [9], z. B. bei

- der vergleichenden Beurteilung von Konzertsälen [10, 11],
- der Bewertung von Lärm [12],
- Untersuchungen der Gehörfunktionen beim räumlichen Hören [2, 13, 14].

Auch die Rundfunkanstalten der ARD beschäftigen sich seit der ersten Kunstkopfsendung während der Internationalen Funkausstellung Berlin, 1973, mit der Möglichkeit der Einführung dieser Technik. In den Rundfunkanstalten, besonders aber auf der Hörerseite, besteht ein lebhaftes Interesse an der Kunstkopfstereofonie, und es ist bisher eine größere Anzahl von Hörspielen und Musikaufnahmen produziert und gesendet worden. Doch trotz ihrer erheblichen Vorteile gegenüber der Intensitätsstereofonie und der Quadrofonie [15] hat sich die Kunstkopfstereofonie noch nicht durchsetzen können; ihre Einführung beim Hörrundfunk ist bisher nur mit Zurückhaltung in Betracht gezogen worden. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Es sind weniger die Probleme am Kunstkopfübertragungssystem selber, die erst in jüngster Zeit gelöst werden konnten [16, 17, 18]. Hierzu gehören vor allem Übertragungsfehler bei der Abbildung von Schallquellen im Bereich „vorne“. Vielmehr sind es die Probleme, die generell bei der Einführung neuer Techniken im Rundfunkbetrieb auftreten. Hierüber hat Plenge [19] ausführlich berichtet. Eine entscheidende Bedeutung

hat das sogenannte Kompatibilitätsproblem: Die „neuen“ Sendungen müssen mit den auf dem Markt befindlichen und eingeführten Empfangsgeräten in der gewohnten Weise ohne Qualitätsverlust empfangen und abgehört werden können.

Der in den Rundfunkanstalten seit 1973 gebräuchliche Kunstkopf KU 80 (Neumann) nach Kürer/Plenge/Wilkens [20] ist ursprünglich für Forschungszwecke entwickelt worden. Einziges Ziel war es, mit Hilfe einer kopfbezogenen Übertragung die gleichen Schalldruckverläufe vor den beiden Trommelfellen zu erzeugen wie im originalen Schallfeld. Das Übertragungssystem vom Kunstkopf bis zum Kopfhörer ist deshalb unabhängig von Kompatibilitätsfragen entstanden. Seit etwa zwei Jahren wird am Institut für Rundfunktechnik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Akustik an der Ruhr-Universität Bochum an einer Verbesserung der Eigenschaften des Neumann-Kunstkopfes gearbeitet [17, 18]. Die bisher dabei durchgeführten Untersuchungen zielten auf verbesserte Übertragungseigenschaften nicht nur bei Kopfhörerwiedergabe, sondern ebenso bei Lautsprecherwiedergabe im Hinblick auf eine für den Rundfunkbetrieb ausreichende Kompatibilität.

## 2. Das Kompatibilitätsproblem

Das Problem der „Verträglichkeit“ der neuen Aufnahmemethode mit den bereits eingeführten Methoden der Intensitätsstereofonie enthält einen großen Fragenkomplex, der sich hinsichtlich verschiedener Teilaspekte aufgliedern und untersuchen läßt. Dazu ist zweckmäßigerweise das Hörereignis auf der Wiedergabeseite zu betrachten: Bei der Wiedergabe der Kunstkopfsignale über Lautsprecher müssen die Eigenschaften des Hörereignisses bestimmten Anforderungen mindestens ebenso genügen, wie dies bei der Wiedergabe entsprechender intensitätsstereofoner Signale der Fall ist. Welches sind die vergleichbaren intensitätsstereofonen Signale? Schon diese Frage läßt sich nicht definitiv beantworten, da in der Praxis sehr unterschiedliche Techniken eingesetzt werden. Die Anzahl, Art und Position der Mikrofone, die Art der Abmischung usw. bestimmen die Eigenschaften der intensitätsstereofonen Signale gravierend. Andererseits muß man voraussetzen, daß trotz dieser gravierenden Unterschiede immer ein befriedigendes Hörerlebnis herbeigeführt wird, daß also „Kompatibilität“ vorliegt. Allein die sehr unterschiedlichen Mikrofonstandorte (geringe Entfernung der Mikrofone zu den Schallquellen bei Anwendung der Polymikrofonie, große Entfernung bei Einsatz eines einzigen XY-Mikrofons) können grundsätzlich verschiede-

dene, aber in jedem Fall akzeptable Aufnahmen ergeben. Die Frage nach der „richtigen“ intensitätsstereofonen Aufnahmemethode ist nicht beantwortet. Deshalb sollen auch für die Lautsprecherwiedergabe die künstlerisch-ästhetischen Aspekte, die vor allem mit der Wahl des Kunstkopfstandortes (in der Regel in erheblich größerer Entfernung als „normale“ Mikrofone) zusammenhängen, zunächst ausgeklammert bleiben. Die Eigenart der Kunstkopfsignale, die sich aus der Abbildung eines günstigen Hörplatzes im Aufnahmeraum ergibt, muß hinsichtlich ihrer „Lautsprecherkompatibilität“ gesondert überprüft werden. Zwei weitere grundsätzliche Aspekte des Kompatibilitätsproblems sind aber zuvor zu klären: Die spektralen Merkmale der Kunstkopfsignale entsprechen näherungsweise den spektralen Merkmalen der Ohrsignale beim natürlichen Hören. Sie können deshalb bei Kopfhörerwiedergabe – eine verzerrungsfreie Gesamtübertragungsstrecke zwischen Ohrkanaleingang des Kunstkopfes und des Hörers vorausgesetzt – vom Gehör interpretiert werden als Merkmale eines Hörereignisortes. In diesem Fall werden die spektralen Merkmale, die sich aus der Richtcharakteristik des (künstlichen) Kopfes ergeben, im Lokalisationsprozeß so „verrechnet“, daß sie nicht als Klangfarbenmerkmal in Erscheinung treten [vgl. 14]. Im Fall der Lautsprecherwiedergabe dagegen zerstören die interauralen Übersprechanteile und zusätzliche lineare Verzerrungen, hervorgerufen durch die Wirkung des Außenohres im Schallfeld des Wiedergaberaums, sowie Reflexionen des Wiedergaberaums die ursprünglichen Lokalisationsmerkmale; ihre „Verrechnung“ kann nicht stattfinden, und es ergeben sich Klangverfärbungen [14]. Infolge der frequenzabhängigen Richtcharakteristik des Kunstkopfes treten also bei Lautsprecherwiedergabe prinzipiell Klangverfärbungen auf. Es ist daher zu klären, welche Kompatibilität bezüglich der Hörereignisklangfarbe überhaupt erreichbar ist. Der dritte Aspekt betrifft die räumliche Abbildung. Die interaurale Übertragungsfunktion des Kunstkopfes ergibt für die Darbietung über eine normale stereotüchtige Lautsprecheranordnung sehr komplexe Differenzen der Lautsprechersignale. Abhängig von der Schalleinfallrichtung enthalten die Kunstkopfsignale gegenüber entsprechenden intensitätsstereofonen Signalen eines XY-Mikrofons abweichende, frequenzabhängige Kanalpegeldifferenzen und zusätzliche Laufzeitdifferenzen. Die Wirkung dieser Signaleigenschaften auf Richtung und Ausdehnung der „Phantom-schallquelle“ läßt sich mit den speziellen Theorien zur „Summenlokalisierung“ nicht abschätzen. Somit war im Experiment zu klären, welche Kompatibilität bezüglich der Hörereignisrichtung vorliegt.

### 3. Messung der Richtungsabbildung

#### 3.1. Versuchsbeschreibung

Die für die Hörversuchsreihe geeigneten Testsignale wurden mit dem Kunstkopf Neumann KU 80 hergestellt. Messungen haben gezeigt, daß die interessierenden **interauralen** Übertragungsfunktionen dieses Kopfes gut mit der des natürlichen Kopfes übereinstimmen und deshalb gegenüber denjenigen eines verbesserten Kopfes vernachlässigbare Abweichungen

aufweisen. Die interauralen Übertragungsfunktionen werden außerdem nicht von einer Entzerrung der Kunstkopfsignale beeinflusst, die im Hinblick auf eine ausreichende Klangfarbenkompatibilität sicher notwendig ist.

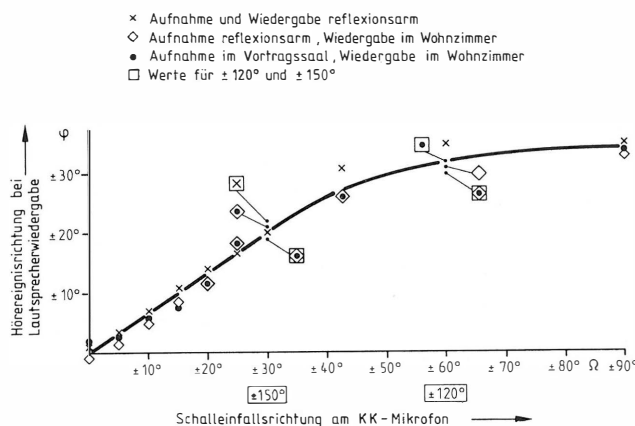
Die Beschallung des Kunstkopfes erfolgte über Lautsprecher, das Lautsprechersignal war ein nachhallfrei aufgenommener Sprecher, die Entfernung zum Kunstkopf betrug 2 m. Als Testsignale wurden die Schalleinfallrichtungen  $\Omega = 0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 90^\circ, \pm 120^\circ, \pm 150^\circ$  und  $180^\circ$  gewählt, bezogen auf die Frontalrichtung. Sie wurden in zufälliger Reihenfolge auf Band aufgezeichnet. Der Kunstkopf befand sich für eine erste Testsignalreihe im reflexionsarmen Raum, damit die Verhältnisse im ungestörten Schallfeld überprüft werden konnten. Im zweiten Fall befand er sich in einem relativ großen Vortragssaal, so daß zusätzlich die Wirkung der akustischen Verhältnisse eines „normalen“ Aufnahmeraums in die Untersuchung eingeschlossen war.

Neben den Kunstkopftestsignalen wurden – als dritte Testsignalreihe – reine intensitätsstereofone Signale hergestellt. Dies erschien notwendig, weil unvermeidliche systematische Fehler der Versuchsanordnung, die besonders durch die Anzeige der Hörereignisrichtung und die Asymmetrie des Wiedergaberaums auftreten, keinen exakten Vergleich mit Angaben aus der Literatur zulassen. Das betrifft vor allem die Lokalisationsunschärfe. Als Testsignale wurden die Kanalpegeldifferenzen im Bereich  $\Delta L = 0$  dB bis  $\pm 14$  dB in Schritten von 2 dB gewählt, die ebenfalls in zufälliger Reihenfolge auf Band aufgezeichnet wurden.

Die Darbietung aller Testsignale geschah unter identischen Bedingungen. Die Lautsprecher befanden sich unter  $\pm 30^\circ$  (Stereo-Standardanordnung) und in einer Entfernung von genau 3 m zum Hörer (Kopfmittelpunkt). Der maximale Schalldruckpegel am Hörort betrug 60 dB (A), bezogen auf 20  $\mu$ Pa. Zur weitgehenden Vermeidung störender optischer Einflüsse saß die Versuchsperson im Mittelpunkt eines kreisförmig angebrachten schalldurchlässigen Vorhangs (Schalldämmung  $< 1$  dB). Der Kopf war ohne Fixierung geradeaus zu halten; Peilbewegungen waren zu vermeiden. Die Richtungsanzeige erfolgte mit Hilfe einer in einem kleinen Pult eingelassenen kreisförmigen Scheibe, deren Winkelstellung elektronisch abgegriffen und nach A/D-Wandlung für die Datenverarbeitung im Rechner abgespeichert wurde. Auf dem Pult war lediglich die Geradeausrichtung markiert. Die Versuchsperson gab alle 10 s ein Urteil ab; jede Testsignalreihe enthielt 4 Urteile je Meßwert (zur Vermeidung von Zieheffekten).

#### 3.2. Ergebnisse

Die Meßergebnisse gehen aus den **Bildern 1 bis 3** hervor. Sie resultieren aus den Urteilen von 12 Versuchspersonen. Jedem Meßwert liegen deshalb zunächst 48 Urteile zugrunde, doch verdoppelt sich diese Anzahl, weil die zur Medianebene symmetrischen Einstellungen  $\pm \Omega$  und  $\pm \Delta L$  und Hörereignisrichtungen  $\pm \varphi$  bei der Auswertung absolut eingesetzt wurden (Ausgleich von Median-Asymmetrien der Meßanordnung).



**Bild 1**  
Richtungsabbildung  $\phi(\Omega)$  des Kunstkopfmikrofons

**Bild 1** gibt die Höreignisrichtung  $\phi$  bei Lautsprecherwiedergabe in Abhängigkeit von der ursprünglichen Schalleinfallrichtung  $\Omega$  am Kunstkopf wieder. Zu unterscheiden sind drei Meßreihen:

- Kunstkopfaufnahme und Lautsprecherwiedergabe im reflexionsarmen Raum,
- Kunstkopfaufnahme im reflexionsarmen Raum, Lautsprecherwiedergabe im Raum mit Wohnzimmercharakter,
- Kunstkopfaufnahme im Vortragssaal, Lautsprecherwiedergabe im Raum mit Wohnzimmercharakter.

Man erkennt, daß die Charakteristik des Aufnahme- bzw. Wiedergaberaums die Richtungsabbildung  $\phi(\Omega)$  nur unerheblich beeinflusst. Sie liegt in der gleichen Größenordnung wie bei Intensitätsstereofonie [vgl. 21]. Dies gilt auch beim Vergleich der Streuungsmaße (sie wurden aus Gründen der Übersicht in **Bild 1** nicht eingetragen).

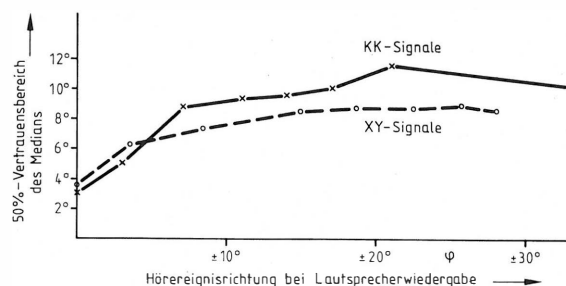
**Bild 1** enthält weiterhin Meßwerte für den Aufnahmebereich „hinten“,  $\Omega = \pm 120^\circ$  und  $\pm 150^\circ$ . Es läßt sich eine gute Frontalsymmetrie feststellen; der hintere Aufnahmebereich wird hinsichtlich Lokalisation und Lokalisationsunschärfe gleichwertig in der Stereobasis abgebildet. Das ist auch zu erwarten, weil die entsprechenden interauralen Signaldifferenzen sich praktisch nur hinsichtlich ihres Spektrums unterscheiden (was bei Sprachsignalen zu Kanalpe-

geldifferenz-Unterschieden  $< 1$  dB führt). Die Wirkung der resultierenden Klangfarbenunterschiede soll an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Es ist aber gut möglich, daß das etwas dumpfere Klangbild, das die ursprünglich hinteren Schallquellen bei Lautsprecherwiedergabe erzeugen, nicht stört.

Es ist festzustellen, daß die Kunstkopfsignale die Schalleinfallsbereiche  $\Omega = 0^\circ$  bis  $\pm 30^\circ$  und  $\Omega = 180^\circ$  bis  $\pm 150^\circ$  im Wiedergabebereich  $\phi = 0^\circ$  bis  $\pm 20^\circ$  linear abbilden. Beliebige Schalleinfallrichtungen führen immer zu Höreignissen innerhalb der Lautsprecherbasis.

**Bild 2** zeigt die vergleichbaren Ergebnisse für Intensitätsstereofonie (Darbietung im reflexionsarmen Raum). Zusätzlich sind die Kurven von Wendt [22] und Mertens [23] angegeben; es besteht gute Übereinstimmung.

**Bild 3** stellt die in **Bild 2** eingetragenen Quartilbereiche in Abhängigkeit von der Höreignisrichtung  $\phi$  dar, weiterhin die unter gleichen Versuchsbedingungen ermittelten Quartilbereiche bei Kunstkopfsignalen. Der 50%-Vertrauensbereich des Medians ist die



**Bild 3**  
Zur Lokalisationsunschärfe bei Lautsprecherwiedergabe von Kunstkopf- und XY-Signalen

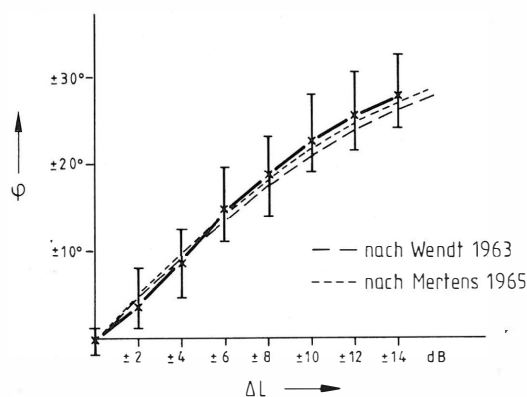
Breite desjenigen Seitenwinkelintervalls, auf das 50 % der Höreignisrichtungen entfallen; er kann als Maß für die Lokalisationsunschärfe dienen. **Bild 3** ermöglicht also einen direkten Vergleich der Lokalisationsunscharfen, die bei Darbietung von XY-Signalen bzw. Kunstkopfsignalen für bestimmte Höreignisrichtungen vorliegen. Es ist festzustellen, daß die Kunstkopfsignale im Höreignisbereich  $\phi = 0^\circ$  bis  $\pm 5^\circ$  die gleiche, im Höreignisbereich  $\phi = \pm 5^\circ$  bis  $\pm 30^\circ$  eine geringfügig höhere Lokalisationsunschärfe hervorrufen als entsprechende XY-Signale.

## 4. Diskussion der Meßergebnisse

### 4.1. Überlegungen zur Theorie

Die interauralen Signaldifferenzen setzen sich zusammen aus Laufzeitunterschieden und gleichsinnig wirkenden – frequenzabhängigen – Pegeldifferenzen. Bei Lautsprecherwiedergabe von Signalen dieser Konstellation spricht man deshalb von „gemischter Stereophonie“. Die Gesetzmäßigkeiten für das Auftreten bestimmter Phantomschallquellen-Richtungen bei Kombination von Laufzeit- und Intensitätsstereophonie sind allerdings nicht genau bekannt, auch die Theorien zur Summenlokalisierung liefern hierfür keine ausreichenden Aussagen [22 bis 26].

Bei gemischter Stereophonie können sehr unterschiedliche Laufzeit/Pegeldifferenz-Kombinationen



**Bild 2**  
Höreignisrichtung  $\phi(\Delta L)$  bei Intensitätsstereofonie



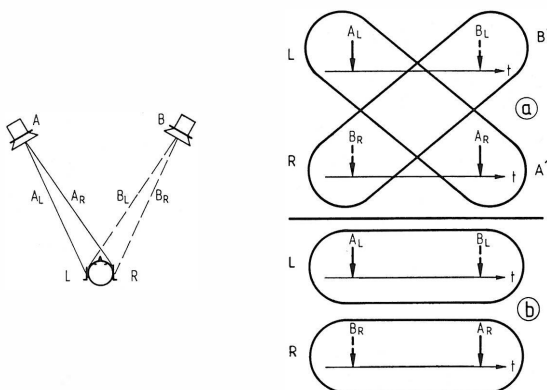
eine einzige Hörereignisrichtung hervorrufen. Dieselbe Hörereignisrichtung kann ebenso von reinen Laufzeit- oder von reinen Intensitätsdifferenzen hervorgerufen werden. In allen Fällen unterscheiden sich die resultierenden Ohrsignale in weiten Bereichen. Wie kann eine Summenlokalisationstheorie dies erklären?

Nach dem Assoziationsmodell [14, 27] bestimmen die Laufzeit- und Pegeldifferenzen der – breitbandigen und kohärenten – Lautsprecher Signale die Richtung der Phantomschallquelle **unabhängig von der Schallfeldüberlagerung**, weil das Gehör die Komponenten der Summensignale, die in den Ohren auftreten, wieder trennt (Bild 4). Dieser Ansatz bietet damit im Gegensatz zu Summenlokalisationstheorien eine Grundlage zur Vorhersage von Hörereignisrichtungen bei gemischter Stereophonie: Er vermittelt, daß eine Äquivalenz von Laufzeit- und Pegeldifferenzen grundsätzlich unabhängig ist von der Schallfeldüberlagerung; eine Zeit/Pegel-Äquivalenz für die Richtung einer Phantomschallquelle ist plausibel. Eine Vorhersage von Hörereignisrichtungen bei gemischter Stereophonie muß daher möglich sein, wenn die entsprechenden Werte für reine Laufzeit- und reine Intensitätsstereophonie bekannt sind.

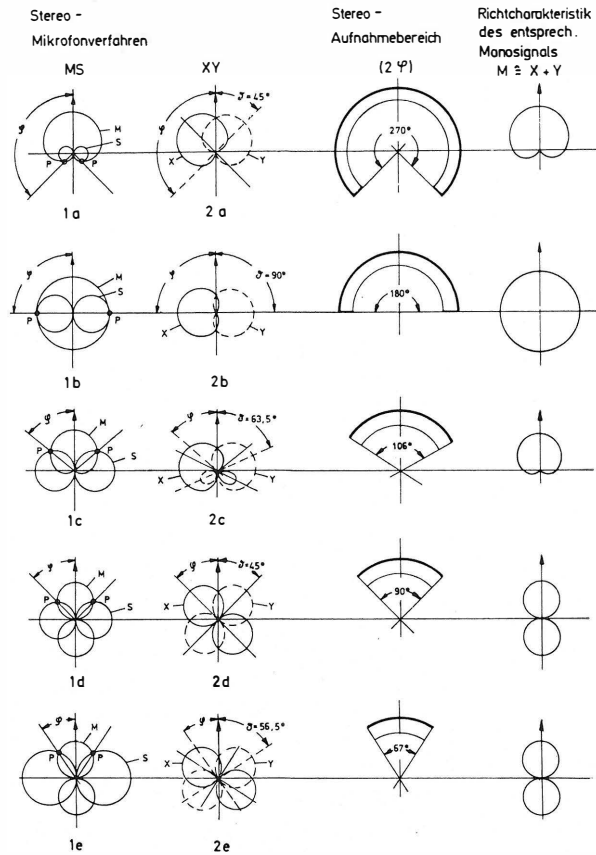
Eine quantitative Überprüfung dieser Vermutung kann anhand der vorliegenden Meßergebnisse erfolgen. Für Intensitätsstereophonie beträgt der Anstieg der Lokalisationskurve  $\varphi$  ( $\Delta L$ ) im Bereich  $\varphi = 0^\circ$  bis  $\pm 20^\circ$  entsprechend Bild 2 0,45 dB/Grad. Er liegt für reine Laufzeitstereophonie innerhalb des gleichen Richtungsbereiches zwischen 33  $\mu\text{s}$ /Grad [28] und 25  $\mu\text{s}$ /Grad [29].

Im Schalleinfallsbereich  $\Omega = 0^\circ$  bis  $\pm 30^\circ$  steigt die Pegeldifferenz des Kunstkopfsignals linear mit  $\Omega$  an, sie beträgt 5 dB für  $\Omega = \pm 30^\circ$  (nach eigener Messung am Sprachsignal und nach [30]). Ebenso steigt der Laufzeitunterschied in diesem Schalleinfallsbereich linear auf 250  $\mu\text{s}$  an. Daraus ergibt sich ein linearer Zusammenhang  $\varphi$  ( $\Omega$ ) im Bereich  $\Omega = 0^\circ$  bis  $\pm 30^\circ$ , die Hörereignisrichtung liegt für  $\Omega = \pm 30^\circ$  rechnerisch zwischen  $\varphi = \pm 19^\circ$  und  $\varphi = \pm 21^\circ$  – in guter Übereinstimmung mit den Meßwerten in Bild 1.

Für gemischte Stereophonie gelten die Gesetzmäßigkeiten von Laufzeit- und Intensitätsstereophonie



**Bild 4**  
Auswertung der Ohrsignale  
in einer Phantomschallquellsituation  
a) Assoziationsprinzip  
b) Summenlokalisationsprinzip



**Bild 5**

Richtcharakteristiken und Aufnahmebereich  
von MS- und XY-Mikrofonverfahren

(Aus dem Handbuch der Studioteknik. Hrsg. Schule für Rundfunktechnik, Nürnberg. K. G. Saur Verlag KG, München 1979)

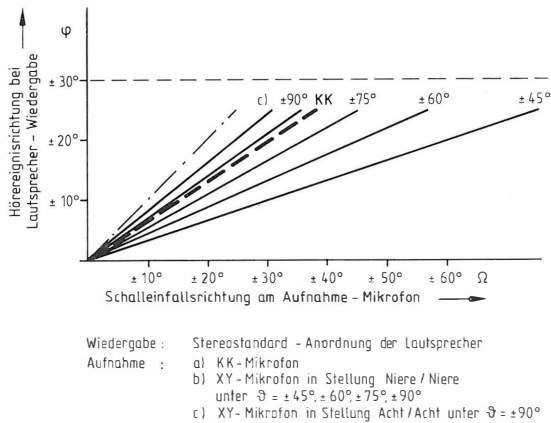
demnach anteilig, je nach Signaldifferenz-Kombination. Bei Kunstkopfsignalen wirken die Laufzeit- und Pegeldifferenzen etwa mit gleichem Gewicht, ihr Amplitudenfrequenzgang beeinträchtigt offenbar die Lokalisation nicht.

Die Lokalisationsunschärfe ist bei Laufzeitstereophonie größer als bei Intensitätsstereophonie [1], sie liegt bei Darbietung von Kunstkopfsignalen entsprechend dazwischen. Auch diese Folgerung trifft nach den Meßwerten in Bild 3 genau zu.

#### 4.2. Folgerungen hinsichtlich der Kompatibilität

Die meßtechnisch und theoretisch ermittelten Abbildungseigenschaften der Kunstkopfsignale bei Darbietung über eine stereofone Lautsprecheranordnung werden zweckmäßigerweise mit den Abbildungseigenschaften der entsprechenden XY- (bzw. MS-) Signale verglichen. Bild 5 gibt verschiedene Richtcharakteristik-Kombinationen von Koinzidenzmikrofonen wieder.

Abhängig von der Schalleinfallsrichtung innerhalb des Aufnahmebereichs führen sie zu Pegeldifferenzen  $\Delta L$  ( $\Omega$ ). Geht man mit diesen Werten in die Kurve  $\varphi$  ( $\Delta L$ ) in Bild 2, so erhält man die Richtungsabbildung  $\varphi$  ( $\Omega$ ) bei Einsatz eines Koinzidenzmikrofons, ganz entsprechend der gemessenen Richtungsabbildung des Kunstkopfmikrofons in Bild 1. Bild 6 gibt die Richtungsabbildungen  $\varphi$  ( $\Omega$ ) bei unterschiedlichen Richtcharakteristik-Kombinationen von Koin-



**Bild 6**  
Richtungsabbildung  $\varphi(\Omega)$  bei unterschiedlichen Mikrofoncharakteristiken

zidenzmikrofonen wieder, ebenso ist  $\varphi(\Omega)$  für das Kunstkopfmikrofon eingetragen.

Man erkennt deutlich, daß das Kunstkopfmikrofon hinsichtlich der Richtungsabbildung im Vergleich zu den üblichen XY- (bzw. MS-) Mikrofonen normale Eigenschaften aufweist. Es kommt dem XY-Mikrofon in Stellung Niere/Niere unter  $\delta = \pm 90^\circ$  sehr nahe, auch deshalb, weil der Aufnahmebereich ebenso wie beim Kunstkopfmikrofon  $360^\circ$  beträgt (Bild 5, 2b).

Keines der Mikrofone erreicht die „ $45^\circ$ -Linie“, für die gilt  $\varphi = \Omega$ . Vielmehr wird das Niere/Niere-Mikrofon mit  $\delta = \pm 45^\circ$  sehr häufig eingesetzt. Es wäre nicht sinnvoll, mit zusätzlichen Maßnahmen, beispielsweise einer Art „Richtungsexpander“, die Richtungsabbildung  $\varphi = \Omega$  anzustreben. Es würden dann alle seitlichen Schalleinfallrichtungen zwischen  $\pm 30^\circ$  und  $\pm 150^\circ$  zu Hörereignissen führen, die sich in Lautsprecherichtung konzentrieren. Die Kunstkopfmikrofone erweisen sich hinsichtlich der Richtungsabbildung als voll kompatibel mit Koinzidenzmikrofonen.

Aber auch hinsichtlich der Lokalisationsunschärfe erreichen Kunstkopfsignale in der Praxis etwa das gleiche Resultat wie XY-Signale. Man muß bedenken, daß die reine Intensitätsstereofonie nur dann erfolgt, wenn der Hörer sich wirklich auf der Mittellinie der Anordnung befindet:

Schon bei seitlichen Versetzungen um 10 cm entstehen Laufzeitdifferenzen von etwa  $300 \mu\text{s}$  (zusätzliche Pegeldifferenzen sind vernachlässigbar), die den vorhandenen Pegeldifferenzen der XY-Signale gleich- oder gegensinnig hinzugefügt werden und zu Hörereignisverschiebungen von  $\pm 10^\circ$  führen. In der Praxis läßt sich also schon bei relativ schmaler Stereohörfläche keine reine Intensitätsstereofonie verwirklichen. Im Fall der Darbietung von Kunstkopfsignalen vergrößern oder verkleinern sich die vorhandenen Laufzeitdifferenzen und führen zu den Hörereignisverschiebungen wie bei Intensitätsstereofonie. Für beide Darbietungsfälle muß also etwa die gleiche Lokalisationsunschärfe, nämlich diejenige für gemischte Stereofonie, angenommen werden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, daß unter anderem beim französischen Rundfunk die gemischte Stereofonie bewußt eingesetzt wird. Das Stereomikrofon besteht

aus zwei Nieren unter  $\delta = \pm 45^\circ$ , die im Abstand von 17 cm angeordnet sind. Ohne auf die Begründung dieser Anordnung hier einzugehen, soll festgestellt werden, daß offenbar ihre Abbildungseigenschaften bei Lautsprecherwiedergabe sehr positiv eingeschätzt werden, sehr niedrig dagegen ihre Nachteile. Die Anordnung bringt ebenso geringfügige Nachteile wie das Kunstkopfmikrofon, aber die Kunstkopfsignale erlauben neben der normalen Lautsprecherwiedergabe uneingeschränkt KunstkopfsterEOFonie. Und die Vorzüge der KunstkopfsterEOFonie sind bekannt!

## 5. Ergebnis

Betrachtet man den Kunstkopf als Stereomikrofon und vergleicht die Abbildungseigenschaften dieses Kunstkopfmikrofons hinsichtlich Lokalisation und Lokalisationsunschärfe mit üblichen XY- (bzw. MS-) Mikrofonen, so ist praktisch Gleichwertigkeit festzustellen. Der Einsatz des Kunstkopfmikrofons kann uneingeschränkt anwendungsorientiert erfolgen, d. h. berücksichtigt werden muß für jeden Anwendungsfall lediglich

- a) die zusätzliche Frage, ob das Mikrofonsignal KunstkopfsterEOFonie zulassen soll oder nicht,
- b) die übliche Frage, welcher Aufnahmebereich und welche Richtungsabbildung geeignet ist.

Das Ergebnis lautet im einzelnen:

1. Bei der Wiedergabe von Kunstkopfsignalen über Lautsprecher in Stereo-Standardanordnung erfolgt „gemischte SterEOFonie“, eine Überlagerung gleichsinnig wirkender Laufzeit- und Pegeldifferenzen.
2. Die Hörereignisrichtung ergibt sich aus der Summe der Wirkung von Laufzeit- und Pegeldifferenz.
3. Die Lokalisationsunschärfe ändert sich nicht im Vergleich mit der Darbietung bisher üblicher Signale.
4. Die auftretenden Differenzen der Amplitudenfrequenzgänge beeinflussen die Lokalisationsunschärfe unwesentlich.
5. Die resultierende Richtungsabbildung liegt im Bereich der gebräuchlichen Koinzidenzmikrofone. Der Aufnahmebereich beträgt  $360^\circ$ .

## 6. Schlußbemerkung

Die Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit Intensitätsstereofonen Signalen bezüglich der Richtungsabbildung bei Lautsprecherwiedergabe ist völlig ausreichend. Der Grund liegt darin, daß die Abbildungseigenschaften eines Kunstkopfmikrofons im Freifeld sich äquivalent zeigen zu denen eines (bestimmten) XY-Mikrofons; zwei verschiedene XY-Mikrofone können sehr viel größere Unterschiede aufweisen! Hinsichtlich der Richtungsabbildung müssen Kunstkopfsignale also nicht zum Zweck einer guten „Lautsprecherkompatibilität“ entzerrt werden. Diese Entzerrung müßte für die KunstkopfsterEOFonie am Wiedergabeort wieder rückgängig gemacht werden. Es wäre ein gravierender Nachteil, wenn KunstkopfsterEOFonie nur mit Hilfe eines entsprechenden Filters, das man dem Kopfhörer vorschalt-

tet, möglich ist. Eine derartige „senderseitige“ Entzerrung ist nicht wünschenswert und glücklicherweise auch nicht notwendig. In Bezug auf die Klangfarbe dagegen muß sicherlich eine geeignete Entzerrung der Kunstkopfsignale erfolgen [17, 18, 31, 32]. Die entsprechenden Untersuchungen stehen vor dem Abschluß. Sie lassen erwarten, daß die Signale des verbesserten Kopfes KU 80 auch in diesem Punkt eine gute Kompatibilität aufweisen.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Blauert, J.: Räumliches Hören. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1974.
- [2] Laws, P.: Zum Problem des Entfernungshörens und der Im-Kopf-Lokalisierung von Hörereignissen. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1972.
- [3] Platte, H.-J.; Laws, P.; v. Hövel, H.: Anordnung zur genauen Reproduktion von Ohrsignalen. Fortschritte der Akustik. DAGA 75, Braunschweig. Physik Verlag, Weinheim 1975, S. 361 bis 363.
- [4] Damaske, P.; Wagener, B.: Richtungshörversuche über einen nachgebildeten Kopf. *Acustica* 21 (1969), S. 30 bis 35.
- [5] Wilkens, H.: Kopfbezogene Stereophonie — ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke. *Acustica* 26 (1972), S. 213 bis 221.
- [6] Burkhard, M. D.; Sachs, R. M.: Anthropometric manikin for acoustic research. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 58 (1975), S. 214 bis 222.
- [7] Blauert, J.: Vergleich unterschiedlicher Systeme zur originalgetreuen elektroakustischen Übertragung. *Rundfunktech. Mitt.* 18 (1974), S. 222 bis 227.
- [8] Kuhl, W.; Plantz, R.: Kopfbezogene Stereophonie und andere Arten der Schallübertragung im Vergleich mit dem natürlichen Hören. *Rundfunktech. Mitt.* 19 (1975), S. 120 bis 132.
- [9] Gottlob, D.: Anwendung der kopfbezogenen Stereophonie in der akustischen Forschung. *Rundfunktech. Mitt.* 22 (1978), S. 214 bis 216.
- [10] Schröder, M. R.; Gottlob, D.; Siebrasse, K. F.: Comparative study of European concert halls; correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 56 (1974), S. 1195 bis 1201.
- [11] Wilkens, H.: Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen. Dissertation. Technische Universität Berlin, 1975.
- [12] Weber, I.; Mellert, V.: Vergleichende Beurteilung von Verkehrsgeräuschen — Korrelation mit Lautsprecherparametern. Fortschritte der Akustik. DAGA 78, Bochum. VDE-Verlag, Berlin 1978, S. 271 bis 274.
- [13] Plenge, G.: On the differences between localization and lateralization. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 56 (1974), S. 944 bis 951.
- [14] Theile, G.: Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld. Dissertation. Technische Universität Berlin, 1980.
- [15] Theile, G.; Plenge, G.: Localization of lateral phantom sources. *J. of the Audio Eng. Soc.* 25 (1977), S. 196 bis 200.
- [16] Hudde, H.; Schröter, J.: The equalization of artificial heads without exact replication of the eardrum impedance. *Acustica* 44 (1980), S. 301 bis 307.
- [17] Theile, G.: „Kunstkopf“ Stereophonie: Results of recent investigations and development of a new Kunstkopf system. IBC 80, Brighton. Conf. Publ. No. 191, S. 350 bis 353.
- [18] Hudde, H.; Schröter, J.: Verbesserungen am Neumann-Kunstkopfsystem. *Rundfunktech. Mitt.* 25 (1981), S. 1 bis 5.
- [19] Plenge, G.: Probleme bei der Einführung der Kunstkopfsterophonie beim Hörrundfunk. *Rundfunktech. Mitt.* 22 (1978), S. 216 bis 218.
- [20] Kürer, R.; Plenge, G.; Wilkens, H.: Correct spatial sound perception rendered by a special two-channel recording method. 37th AES Convention, New York 1969. Preprint 666 (H-3).
- [21] Ortmeier, W.: Über die Lokalisierung von Schallquellen bei der Zweikanalstereophonie. *Hochfrequenztech. und Elektroakustik* 75 (1966), S. 77 bis 87.
- [22] Wendt, K.: Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereophonie. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1963.
- [23] Mertens, H.: Directional hearing in stereophony — Theory and experimental verification. E.B.U. Rev. Part A Tech. No. 92, August 1965, S. 146 bis 158.
- [24] Franssen, N. V.: Stereophonie. Philips Tech. Bibl., Eindhoven 1963.
- [25] Leakey, D. M.: Some measurements on the effects of interchannel intensity and time differences in two channel sound systems. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 31 (1959), S. 977 bis 986.
- [26] Makita, Y.: On the directional localisation of sound in the stereophonic sound field. E.B.U. Rev. Part A Tech. No. 73, June 1962, S. 102 bis 108.
- [27] Theile, G.: Weshalb ist der Kammfiltereffekt bei Summenlokalisierung nicht hörbar? Vortrag auf der 11. Tonmeistertagung, Nov. 1978 Berlin.
- [28] Blauert, J.; Cobben, W.: Some considerations of binaural cross correlation analysis. *Acustica* 39 (1978), S. 96 bis 104.
- [29] Wilkens, H.; Plenge, G.: Unveröffentlichte Ergebnisse am Heinrich-Hertz-Institut Berlin, 1980.
- [30] Steinberg, J. C.; Snow, W. B.: Physical factors. *The Bell System Tech. J.*, Vol. XIII No. 2, April 1934, S. 245 bis 258.
- [31] Schöne, P.: Zur Nutzung des Realisierungsspielraums in der kopfbezogenen Stereophonie. *Rundfunktech. Mitt.* 24 (1980), S. 1 bis 11.
- [32] Schöne, P.: Messungen zur Klangfarbe von Kunstkopfaufnahmen. Hörrundfunk 5. NTG-Fachberichte Bd. 72, VDE-Verlag, Berlin 1980, S. 44 bis 50.

ZUR KOMPATIBILITÄT VON KUNSTKOPFSIGNALEN MIT INTENSITÄTSSTEREOFONEN  
SIGNALEN BEI LAUTSPRECHERWIEDERGABE: DIE KLANGFARBE<sup>1</sup>VON GÜNTHER THEILE<sup>2</sup>

Manuskript eingegangen am 1. Juli 1981

Kopfbezogene Stereophonie

**Zusammenfassung**

Für die Einführung der Kunstkopfsterophonie beim Hörrundfunk hat das Kompatibilitätsproblem eine entscheidende Bedeutung. In einer vorangegangenen Untersuchung wurde bereits gezeigt, daß bei Wiedergabe der Kunstkopfsignale über Lautsprecher eine gleichwertige Richtungsabbildung auftritt wie bei Wiedergabe entsprechender Signale eines Koinzidenzmikrofons. Bei der Weiterentwicklung des Kunstkopfes NEUMANN KU 80 brauchten die Kompatibilitätseigenschaften hinsichtlich der Richtungsabbildung also nicht verbessert zu werden. Hinsichtlich der Klangfarbe dagegen mußte eine geeignete Entzerrung der Kunstkopfsignale erfolgen.

Während man früher die natürlichen Ohrsignale an einer bestimmten Ebene des Gehörgangs nachzubilden versucht hat, gab es später Vorschläge, die Kunstkopfsignale dem standardisierten freifeldentzerrten Kopfhörer anzupassen. Man ging davon aus, daß freifeldangepaßte Mikrofonsignale im Prinzip Lautsprecherkompatibilität aufweisen müssen.

Es hat sich jedoch gezeigt, daß eine derartige Freifeldanpassung wegen der frequenzabhängigen Richtcharakteristik des Kunstkopfmikrofons nur dann zu klangverfärbungsfreier Lautsprecherwiedergabe führt, wenn die Schalleinfallrichtung am Kunstkopf mit der Bezugsrichtung seiner Entzerrung übereinstimmt. Eine Freifeldentzerrung kann immer nur für eine Schalleinfallrichtung zutreffen, beeinflußt aber das Übertragungsmaß für alle Schalleinfallrichtungen. Das bedeutet, daß auch der für den Klangeindruck entscheidende Frequenzgang des Diffusfeldübertragungsmaßes von der gewählten Freifeldbezugsrichtung abhängt. In Hinblick auf die üblichen Anforderungen an die in der Studioteknik gebräuchlichen Stereomikrofone wurde deshalb der neue Kunstkopf so entzerrt, daß nicht ein bestimmter Freifeldfrequenzgang, sondern sein Diffusfeldfrequenzgang eben ist. Er erweist sich damit in der Praxis auch hinsichtlich der Klangfarbe als kompatibel mit Koinzidenzmikrofonen.

**Summary On the compatibility of artificial-head signals with intensity-stereophonic signals when reproduced by means of loudspeakers: the sound quality**

The problem of compatibility plays a decisive part in the introduction of artificial-head stereophony in sound broadcasting. In an earlier demonstration already, it was shown that, with the reproduction of artificial-head signals by means of loudspeakers, an equivalent directional image occurs as for the reproduction of the corresponding signals from a coincidence microphone. In the subsequent development of the NEUMANN KU 80 artificial head, it was, therefore, not necessary to improve the compatibility characteristics as regards the directional image. As regards the sound quality, on the other hand, a suitable correction of the artificial-head signals had to be effected.

Whereas earlier endeavours had sought to simulate the natural aural signals at a given plane of the auditory meatus, it was proposed subsequently to match the artificial-head signals to the standardised free-field corrected headset. Those proposals were based on the fact that, in principle, free-field matched microphone signals must have loudspeaker compatibility.

However, it became evident that, because of the frequency-dependent directional pattern of the artificial-head microphone, such free-field matching results in loudspeaker reproduction free from sound coloration, only when the direction of sound incidence at the artificial head coincides with the reference direction of its correction. Free-field correction can always apply to only one direction of sound incidence, but it influences the transmission level for all the directions of sound incidence. This signifies, moreover, that the frequency characteristic of the diffused-field transmission level, which is decisive for the sound impression, depends on the free-field reference direction chosen. In consideration of the customary demands made on stereophonic microphones used in studios, the new artificial head was, therefore, corrected in such a way that it was its diffused-field frequency characteristic, and not a particular free-field frequency characteristic, that is uniform. It is thus, in practice, compatible with coincidence microphones also as regards the sound quality.

**Sommaire Compatibilité des signaux de tête artificielle et des signaux en stéréophonie d'intensité en cas de reproduction par haut-parleurs: coloration du son**

Le problème de la compatibilité revêt une importance fondamentale pour l'introduction de la stéréophonie à tête artificielle en radiodiffusion sonore. Des recherches antérieures ont montré qu'en cas de reproduction par haut-parleurs de signaux captés au moyen d'une tête artificielle, on observe la même image sonore directionnelle qu'en cas de reproduction de ces signaux captés par un microphone à coïncidence. Lors de la mise au point de la tête artificielle NEUMANN KU 80, il n'a de ce fait pas été nécessaire d'améliorer les caractéristiques de compatibilité en ce qui concerne l'image directionnelle. Pour la coloration du son, par contre, il a fallu corriger de façon appropriée les signaux de tête artificielle.

Tandis qu'auparavant on s'efforçait de reproduire les signaux perçus naturellement à un certain niveau du conduit auditif, on a plutôt recherché par la suite à adapter les signaux de tête artificielle au casque normalisé à champ corrigé, en se basant sur le principe que des signaux de microphone en champ libre doivent être compatibles pour des haut-parleurs.

Il est cependant apparu que, comme la directivité dépend de la fréquence, cette adaptation au champ libre ne permet une reproduction par haut-parleurs sans détérioration du son que lorsque la direction d'incidence du son à la tête artificielle correspond à la direction de référence de sa correction. Une correction de champ libre ne peut jamais s'appliquer qu'à une seule direction d'incidence du son, mais elle influence le facteur de propagation de toutes les directions d'incidence. Cela signifie également que la réponse en fréquence du facteur de propagation du champ diffus, qui détermine l'impression sonore, dépend du choix de la direction de référence pour le champ libre. Compte tenu des exigences habituellement imposées aux microphones stéréophoniques pour studios, on a corrigé la nouvelle tête artificielle pour obtenir une réponse en fréquence de champ diffus uniforme, et non une réponse déterminée de champ libre. Dans la pratique, cette tête se révèle donc compatible avec les microphones à coïncidence, même pour ce qui est de la coloration du son.

<sup>1</sup> Der Gegenstand dieses Aufsatzes ist zum Patentschutz angemeldet (unveröffentlichte Patentanmeldung P31 02 965.5).

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Günther Theile ist Leiter des Arbeitsbereiches Systeme der Ton-Aufnahme/Wiedergabe im Institut für Rundfunktechnik, München.

## 1. Einleitung

In den Rundfunkanstalten wird nahezu ausschließlich der Kunstkopf KU 80 (Neumann) eingesetzt. Der dazu verwendete Kopfhörer ist in den meisten Fällen ein offener Kopfhörer, sehr häufig der Kopfhörer HD 414 (Sennheiser). Diese Gerätekombination entspricht aber nur dem Stand unseres Wissens vor etwa zwölf Jahren. Inzwischen hat die Forschung, die sich mit dem räumlichen Hören beschäftigt, bemerkenswerte Fortschritte gemacht. Das ist nicht zuletzt der Tatsache zu verdanken, daß es Kunstkopfsysteme mit befriedigenden Abbildungseigenschaften gab. Damit eng verknüpft konnten neue Erkenntnisse in der Kunstkopfforschung gewonnen werden. Darüber hinaus haben die Erfahrungen, die man in den Rundfunkhäusern mit Kunstkopfstereofonie gemacht hat, wichtige Anstöße zur Verbesserung des Kunstkopfsystems gegeben.

Über ein verbessertes Kunstkopfkonzept und speziell über konkrete Verbesserungsmaßnahmen am KU 80 haben Hudde und Schröter [1] berichtet. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag darin, die richtungsabhängigen Übertragungseigenschaften des Systems besser an die einer „typischen“ Versuchsperson anzupassen, um die bekannten Lokalisationsfehler zu vermeiden. Erste Hörversuche mit einem Labormuster des Kopfes mit „typischer“ Richtcharakteristik zeigen eine wesentliche Verbesserung der Abbildungseigenschaften [2]. Das gilt bezüglich der Natürlichkeit der klanglichen und räumlichen Wiedergabe und besonders bezüglich der Richtungsabbildung in der Medianebene. Richtungsinversonen traten nicht wesentlich häufiger auf als beim natürlichen Hören, Im-Kopf-Ortungen wurden bei den orientierenden Versuchen nicht mehr festgestellt.

Das Kompatibilitätsproblem (vgl. [3]) hatte bei der Weiterentwicklung des Kunstkopfes KU 80 eine entscheidende Bedeutung. Ursprünglich für Forschungszwecke entwickelt und eingesetzt, war der Kopf völlig unabhängig von der Forderung entstanden, daß Kunstkopfaufnahmen im Vergleich zu Aufnahmen in üblicher Technik ohne Qualitätsverlust über Lautsprecher abgehört werden können. Seit der ersten Kunstkopfsendung im Hörfunk wuchs auf der Hörerseite das Interesse an dieser Technik sehr schnell an, doch in den Rundfunkanstalten wurde damit das Bedürfnis nach ausreichender „Lautsprecherkompatibilität“ immer dringlicher. Besonders die Erfahrungen bei Musikproduktionen machten deutlich, daß der Kunstkopf speziell in Hinblick auf Klangfarbentreue verbessert werden mußte.

Über die Untersuchung der Kompatibilitätseigenschaft des Kopfes KU 80 hinsichtlich der Richtungsabbildung wurde ebenfalls bereits berichtet [3]. Es hat sich gezeigt, daß die Abbildungseigenschaften des Kunstkopfes im Freifeld sich bei Lautsprecherwiedergabe äquivalent zeigen zu denen eines entsprechenden XY-Mikrofons. Der Kopf läßt sich in Hinblick auf Lokalisation und Lokalisationsunschärfe ohne Einschränkung wie ein Koinzidenzmikrofon einsetzen; er brauchte deshalb in diesem Punkt nicht geändert zu werden.

Geändert werden mußten dagegen die spektralen Eigenschaften der Kunstkopfsignale, um eine akzeptable Klangqualität bei Lautsprecherwiedergabe zu

erreichen. Auch in Hinblick auf die Klangfarbe wurde eine Gleichwertigkeit mit den in der Studio-technik gebräuchlichen Stereomikrofonen angestrebt.

## 2. Problemanalyse

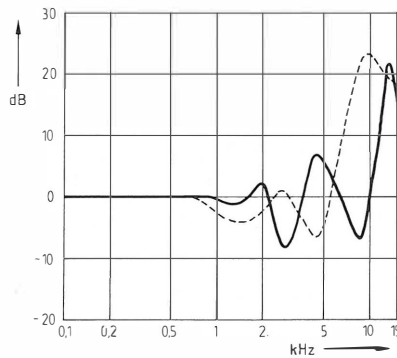
Das Kunstkopfsystem KU 80 plus Kopfhörer HD 414 ist entstanden mit der Idee, die Schalldruckverläufe, die direkt vor den beiden Trommelfellen eines natürlichen Kopfes gemessen werden, nachzubilden und zu übertragen. Um die Mikrofon-signale des Kunstkopfes, die den Schalldruckverläufen so weit wie möglich entsprechen, ohne lineare Verzerrungen an die Trommelfelle des Hörers zu bringen, mußte ein Kopfhörer verwendet werden, dessen Übertragungsfunktion (bis zum Meßpunkt am Trommelfell des Abhörenden) frequenzunabhängig ist [4]. Man ging bei der Konstruktion davon aus, daß die Richtcharakteristik des Ohres von der Trommelfellimpedanz und vom äußeren Ohrkanal abhängig wäre, daß also das Außenohr von Kopf bis einschließlich Trommelfell nachgebildet werden müßte. Noch vor etwa drei Jahren wurde von Platte/Laws [5] nach einer rein meßtechnischen Untersuchung diese Notwendigkeit bestätigt; die Nachbildung der Trommelfellimpedanz erschien als dringendes Problem im Kunstkopfbau [6].

Offenbar hat diese Vorstellung vom Kunstkopf-gesamtsystem die technische Weiterentwicklung nicht nur hinsichtlich einer genauen Nachbildung der natürlichen Richtcharakteristik behindert, sondern auch hinsichtlich der Kompatibilität: Erst mit dem theoretischen und experimentellen Nachweis von Hudde und Schröter [7], daß in der Praxis auf eine mechanische Trommelfellnachbildung verzichtet und die „falsche“ Impedanz durch elektrische Entzerrung der Mikrofon-signale korrigiert werden kann, begannen intensive Bemühungen um eine Lautsprechertauglichkeit dieser Mikrofon-signale [2, 8, 9].

Der KU 80 sollte also die elektrischen Entsprechungen der natürlichen Trommelfellsignale liefern. Den Entwicklern war die sehr grobe Trommelfell-nachbildung als Fehlerquelle bekannt, aber unbekannt war die Wirkung dieser Fehlerquelle auf den richtungswirksamen Teil der Übertragungsfunktionen des Kunstkopfes. Doch es erschien sinnvoll, zunächst unabhängig von einer genauen Trommelfell-nachbildung (sie ist bis jetzt nicht gelungen [10]) den Kunstkopf zu bauen. Denn erstens konnte man die Auswirkungen dieser – scheinbaren – Fehlerquelle auf die Abbildungseigenschaften nicht ohne Kunstkopf untersuchen, zweitens war völlig unklar, wie der unzureichenden Trommelfellnachbildung beizukommen war. Drittens war zu hoffen, daß sich aus der Summe aller (spektralen) Fehler ein Fehleranteil abspalten läßt, der sich unabhängig von der Schalleinfallrichtung verhält, und der deshalb durch geeignete Entzerrung im Übertragungskanal ausgeglichen werden kann.

Tatsächlich hatte sich in Hörversuchen erwiesen, daß die Übertragungsfunktion des Kopfhörers HD 414 keine ungünstige Entzerrung darstellt [11, 12, 13, 14] und diesen Ausgleich schon teilweise vornimmt. Diesen Sachverhalt zeigen auch Messungen, die später im Zusammenhang mit der konzipierten Freifeldan-



**Bild 1**

Frequenzgang des Freifeldanpassungsfilters für den Kunstkopf KU 80 nach [9] (gestrichelte Kurve) und Frequenzgang des Freifeldkorrekturfilters für den Kopfhörer HD 414 nach [1] und [5] (durchgezogene Kurve)

passung der Kunstkopfsignale an den freifeldentzerrten Kopfhörer [1, 8] erfolgten (**Bild 1**). Der Frequenzgang des Freifeldanpassungsfilters für den KU 80 nach [9] (es glättet das Freifeldübertragungsmaß des KU 80 bei frontalem Schalleinfall) und der Frequenzgang des Freifeldkorrekturfilters für den HD 414 nach [1] und [5] (es glättet das Freifeldübertragungsmaß des HD 414, bezogen auf frontalen Schalleinfall) verlaufen in erster Näherung invers zueinander; die linearen Verzerrungen der Gesamtübertragungsstrecke KU 80 – HD 414 reduzieren sich sogar etwas im Frequenzbereich 2 bis 5 kHz. **Bild 1** vermittelt, daß der Übertragungsfehler dieses Kunstkopfsystems hinsichtlich des Amplitudenspektrums im Frequenzbereich unterhalb etwa 5 kHz zwischen 0 und +6 dB liegt. Der Übertragungsfehler in diesem Frequenzbereich ist überraschend gering – wird doch ein nach DIN 45 500 [15] freifeldentzerrter Kopfhörer für die Wiedergabe von Kunstkopfsignalen benutzt, welche von der Idee her den natürlichen Ohrsignalen vor den Trommelfellen entsprechen sollen!

**Bild 1** vermittelt weiterhin, daß die Übertragungsstrecke einen Tiefpaß mit etwa 6 kHz Grenzfrequenz darstellt. Der für die Lokalisation im Frontalbereich so wichtige Frequenzbereich um 8 kHz [16] wird praktisch nicht übertragen. Hinsichtlich der Klangfarbe ergibt sich daraus für den KU 80 zunächst die Feststellung, daß bei Wiedergabe über den Kopfhörer HD 414 starke Klangverfärbungen wahrgenommen werden, die sich vor allem durch den Mangel an Höhen auszeichnen.

Der Versuch, Gehörkanal- und Trommelfellnachbildung am KU 80 zu realisieren, führte zu den schlechten Klangfarbeneigenschaften. Die akustische Kopplung zwischen Ohreingang und Mikrofon geschieht beim KU 80 über einen 25 mm langen Ohrkanal von 6 mm Durchmesser, woran sich ein Koppeler anschließt, der die Querschnittsanpassung zum Mikrofon (21 mm Durchmesser) und einen Strömungswiderstand enthält. Das resultierende große Volumen zwischen Ohrkanaleingang und Mikrofonmembran und die akustisch ungünstige Ausbildung dieser Ankopplung führen zu der starken Absenkung der hochfrequenten Anteile des Signalspektrums oberhalb von etwa 6 kHz.

An dieser Stelle sei aber darauf hingewiesen, daß das Konzept der genauen Gehörkanal- und Trommel-

fellnachbildung im Prinzip nicht falsch ist, sondern lediglich ungünstig in bezug auf die für die Lautsprecherkompatibilität notwendige Entzerrung: Das Kunstkopfsystem kann nur an der Stelle der Übertragungskette entzerrt werden, wo sich nicht der richtungswirksame Teil, sondern ein richtungsunwirksamer Teil befindet. Letzterer ist beim KU-80-Konzept erst hinter der Mikrofonmembran vorhanden, so daß hier sehr zuungunsten des Rauschabstandes eine Entzerrung durchgeführt werden müßte. Aber schon Blauert [17] und Mehrgardt/Mellert [18] haben festgestellt, daß die Übertragungsfunktion des Gehörgangs von der Schalleinfallrichtung unabhängig ist (etwa 3 mm einwärts des Gehörgangs kann sich nur noch die Grundmode der Schallwelle ausbreiten), und es wurde deshalb später vorgeschlagen, den Gehörgang zugunsten eines möglichst glatten Frequenzgangs zu kürzen [19].

Die Idee „glatter Frequenzgang“ hat eine große Bedeutung für die geforderte Klangverfärbungsfreiheit bei Lautsprecherwiedergabe, doch dieses Problem berührt prinzipiell nicht Fragen der Ausgestaltung der inneren Übertragungsglieder (hierüber wird an anderer Stelle berichtet [20]).

Somit war es die klar definierte Aufgabe bei der Weiterentwicklung des Kunstkopfes KU 80, die optimale Entzerrung eines „Stereomikrofons“ zu ermitteln, dessen – stark frequenzabhängige – Richtcharakteristik entsprechend der vorangegangenen Untersuchungen [1, 2] festliegt.

### 3. Welche Entzerrung ist optimal?

Die bisherige intensitätsstereofone Aufnahmetechnik ist bezogen auf die Wiedergabe über Lautsprecher. Verwendet man anstelle der Lautsprecher einen Kopfhörer, so soll dieser möglichst den gleichen Klangeindruck erzeugen wie die Lautsprecher. Es erscheint naheliegend, diese Aussage auf die KunstkopfsterEOFonie anzuwenden; der Rückschluß lautet: Die KunstkopfsterEOFonie ist bezogen auf die Wiedergabe über Kopfhörer. Bezieht man sich dazu gerade auf denjenigen Kopfhörer, der bei intensitätsstereofonen Signalen den gleichen Klangeindruck erzeugt wie die Lautsprecher, so sind die Kunstkopfsignale damit zwangsläufig geeignet für die Wiedergabe über Lautsprecher. Die Konsequenz lautet [5, 8, 9, 19, 22]: Wenn der nach DIN 45 500 [15] standardisierte, auf frontalen Schalleinfall freifeldentzerrte Kopfhörer bei Kunstkopfsignalen den gleichen Klangeindruck erzeugt wie die Lautsprecher bei Intensitätsstereofonie, so sind die auf diesen Kopfhörer bezogenen, freifeldangepaßten Kunstkopfsignale bezüglich der Klangfarbe kompatibel mit intensitätsstereofonen Signalen.

Platte/Laws [5] haben als erste vorgeschlagen, die Entzerrung der Kunstkopfsignale exakt auf eine genaue Freifeldentzerrung des Kopfhörers für frontalen Schalleinfall anzupassen. Da dieser Kopfhörer ein frequenzunabhängiges Freifeldübertragungsmaß aufweist, ist es also erforderlich, für frontalen Schalleinfall am Kunstkopf ebenfalls einen „glatten Frequenzgang“ zu erhalten. Wenn in dieser Form die Schnittstelle zwischen Aufnahme- und Wiedergabe-seite entzerrt ist, liegt nicht nur eine verzerrungsfreie Übertragungsstrecke Kunstkopf–Kopfhörer vor,

sondern es ist nach Schöne [9] Kompatibilität zur Lautsprecherwiedergabe gewährleistet.

Zur Überprüfung dieser Annahme wurde ein unveränderter Kopf KU 80 mit Hilfe eines elektrischen „Freifeldanpassungsfilters“ für frontalen Schalleinfall freifeldentzerrt (vgl. **Bild 1**, Übertragungsfunktion des Kunstkopffilters). Ein Klangfarbenvergleich mit gebräuchlichen Mikrofonen im freien Schallfeld zeigte bei frontalem Schalleinfall eine hohe Klangfarbenähnlichkeit [9].

Doch das Ergebnis läßt noch keine Aussage zur Kompatibilität zu, weil die Wirkung der frequenzabhängigen Richtcharakteristik unberücksichtigt geblieben war: Die freifeldangepaßten Kunstkopfsignale liefern theoretisch sicher nur dann ebensowenig Klangverfärbungen wie die Signale eines entsprechenden Vergleichsmikrofons, wenn die Schalleinfallrichtung am Kunstkopf gleich der Bezugsrichtung seiner Freifeldanpassung ist. Andererseits sollte man nach der vorausgegangenen Überlegung davon ausgehen können, daß gerade wegen der Anpassung an den freifeldentzerrten Kopfhörer diese Kunstkopfsignale auch Lautsprecherkompatibilität aufweisen.

Zur Klärung dieses Problems bot sich zunächst ein rein praktisches Vorgehen an: Mit dem freifeldangepaßten Kopf KU 80 wurden diverse Konzertaufnahmen gemacht. Die Schalleinfallrichtungen am Kunstkopf weichen also sicher vorwiegend von der Bezugsrichtung seiner Freifeldanpassung ab. Die Konzertaufnahmen wurden im direkten Vergleich mit entsprechenden intensitätsstereofonen Aufnahmen über Lautsprecher abgehört. Das Ergebnis war zunächst ermutigend, die Klangfarben erwiesen sich nahezu als gleichwertig. Als jedoch später der neuentwickelte KU 80 mit verbesserter, „typischer“ Richtcharakteristik (vgl. Hudde/Schröter [1]) mit dem Freifeldanpassungsfilter kombiniert wurde, brachte ein erneuter Klangfarbenvergleich ein enttäuschendes Ergebnis: Die Klangfarbe des neuen Kopfes war nicht akzeptabel. Offenbar führte eine sehr starke Anhebung im oberen Frequenzbereich zu dem wahrzunehmenden „spitzen“ Klang (hinzu kamen außerdem Klirrserscheinungen der eingebauten Elektretkapseln bei mittleren bis hohen Schalldruckpegeln). Das Phänomen erklärt sich aus dem Tiefpaßverhalten des KU 80 einerseits und der Wirkung der Richtcharakteristik andererseits.

Die Freifeldanpassung des KU 80 stellt praktisch eine Entzerrung des 6-kHz-Tiefpasses dar. Oberhalb dieser Grenzfrequenz hat die Richtcharakteristik praktisch keine Wirkung mehr; es gibt bei Schalleinfallrichtungen, die von der frontalen abweichen, kaum klangbeeinflussende spektrale Anhebungen. Dies ist aber besonders gravierend der Fall, sobald die Richtcharakteristik auch im oberen Frequenzbereich „stimmt“: Gerade der Bezug auf den frontalen Schalleinfall erfordert eine Entzerrung der sogenannten „8-kHz-Senke“ [17, 21, 23], das heißt, es muß im 8-kHz-Bereich eine Anhebung um 15 bis 20 dB erfolgen. Die „8-kHz-Senke“ ist aber ein markantes Merkmal der Freifeldübertragungsfunktion für den frontalen Schalleinfall, und aus diesem Grunde werden Freifeldübertragungsfunktionen aller anderen Rich-

tungen mit einer entsprechend großen 8-kHz-Anhebung versehen.

Eine Freifeldentzerrung kann immer nur für eine Schalleinfallrichtung zutreffen, sie beeinflusst aber das Übertragungsmaß für alle Schalleinfallrichtungen. Dieser Sachverhalt hat bei der Suche nach der optimalen Entzerrung die entscheidende Bedeutung. Er führt weiter zu folgenden Aspekten und Überlegungen:

1. Gerade die genaue Anpassung der Kunstkopfsignale an den standardisierten freifeldentzerrten Kopfhörer, wie sie Platte/Laws [5] und Schöne [8] vorgeschlagen haben, ist für die Lautsprecherwiedergabe nicht geeignet. Es wird deshalb im Prinzip für diesen Kopfhörer ein Korrekturfilter zwecks Anpassung an die gesuchte Kunstkopfentzerrung benötigt. Theoretisch ist für Kopfhörerwiedergabe die Wahl der Entzerrung beliebig, da mit einer geeigneten Kopfhörerentzerrung die Übertragungstrecke grundsätzlich verzerrungsfrei arbeiten kann. Es ist aber anzustreben, daß die standardisierte Kopfhörerentzerrung sich zumindest näherungsweise für die gefundene Kunstkopfentzerrung eignet. Unter Umständen gewährleistet diese Kunstkopfentzerrung einerseits eine akzeptable Klangfarbe bei Lautsprecherwiedergabe und andererseits minimale Lokalisationsfehler bei Wiedergabe über einen bestimmten Kopfhörer nach DIN 45 500 [15] (dessen realer Freifeldfrequenzgang gerade die notwendige Korrektur darstellt). Die Diskrepanz zwischen Kunstkopf- und Kopfhörerentzerrung sollte deshalb die Größenordnung des Toleranzschlauches der DIN 45 500 nicht wesentlich überschreiten.
2. Unabhängig von der Definition der Schnittstelle Aufnahme/Wiedergabe sind die spektralen Merkmale, die durch die Wirkung der Richtcharakteristik des Kunstkopfes auftreten, auf der Wiedergabeseite vorhanden. Bei verzerrungsfreier Kopfhörerwiedergabe können sie vom Gehör als Merkmale eines Schallereignisortes interpretiert werden; das Gehör „verrechnet“ die spektralen Merkmale derart, daß sie nicht als Klangfarbenmerkmal in Erscheinung treten. (Dieses Phänomen bei der Lokalisation ist sehr einfach nachzuweisen: Eine Versuchsperson, die sich im reflexionsarmen Raum vor einem Lautsprecher, der weißes Rauschen abstrahlt, langsam um 180° dreht, empfendet bei zweiohrigem Hören kaum Klangfarbenänderungen, obwohl die Spektren der Ohrsignale sich durch die Wirkung der Richtcharakteristik (vgl. [24]) stark ändern.) Im Fall der Lautsprecherwiedergabe dagegen zerstören die interauralen Übersprechanteile und zusätzliche lineare Verzerrungen, hervorgerufen durch die Wirkung des Außenohres des Abhörenden im Wiedergaberaum, sowie Reflexionen des Wiedergaberaums die ursprünglichen Lokalisationsmerkmale; ihre „Verrechnung“ kann nicht stattfinden, und es ergeben sich daraus die Klangverfärbungen [24].
3. Diese Klangverfärbungen sind im Prinzip unvermeidlich. Es sei denn, man erreicht durch geeignete Kompensationsschaltungen (z. B. Tradis-Verfahren [22, 25]), daß die Kunstkopfsignale bei Lautsprecherwiedergabe praktisch unverzerrt an

die Ohren des Hörers gelangen. Diese „Nachbildung der Kopfhörer-Übertragungsfunktion“ bei Lautsprecherwiedergabe würde theoretisch eine ungestörte „Verrechnung“ der ursprünglichen Lokalisationsmerkmale, also Klangverfärbungsfreiheit, gewährleisten. Doch es ist in der Praxis sicher nicht möglich, mit dem „Tradis“-Ansatz ein lautsprecherkompatibles Signal zu senden, weil die individuellen Abhörbedingungen sich zu sehr unterscheiden. Darüber hinaus würde ein derartiges Kunstkopffilter ein dazu inverses Filter für die Kopfhörerwiedergabe erfordern.

4. Die Wahrnehmbarkeit von linearen Verzerrungen beim Hören ist untersucht worden [26, 27, 28]. Ein in diesem Zusammenhang wichtiges Ergebnis ist die bessere Wahrnehmbarkeit von schmalbandigen Anhebungen („Höckern“) im Frequenzgang gegenüber entsprechenden Senken. „Höcker“ werden auch dann noch gehört, wenn gleich große Senken nicht mehr wahrnehmbar sind. Den Untersuchungen ist zu entnehmen, daß etwa ein terzbreiter, 3 dB hoher Höcker oder ein 5 dB hoher Höcker mit der Breite einer halben Terz die Wahrnehmbarkeitsschwelle darstellen, die Senken dagegen eine Tiefe von etwa 9 dB bzw. 15 dB aufweisen dürfen.
5. Befindet sich ein Mikrofon bei der Schallaufnahme in einem Raum, so ist für das Klangbild schon bei einem relativ kleinen Abstand des Mikrofons von der Schallquelle nicht nur der für frontalen Schalleinfall gemessene Freifeldfrequenzgang, sondern auch der sogenannte Diffusfeldfrequenzgang des Mikrofons maßgebend [29, 30, 31, 32]. Dies ist der Frequenzgang des Mikrofons für Schall, der annähernd statistisch gleich verteilt (auch zeitlich) aus allen Raumrichtungen auf das Mikrofon trifft [33, 34, 35]. Er ist für den Klangeindruck bestimmend, den die Schallrückwürfe von den Begrenzungsflächen des Raumes hervorrufen, also für den gesamten indirekten Schall.

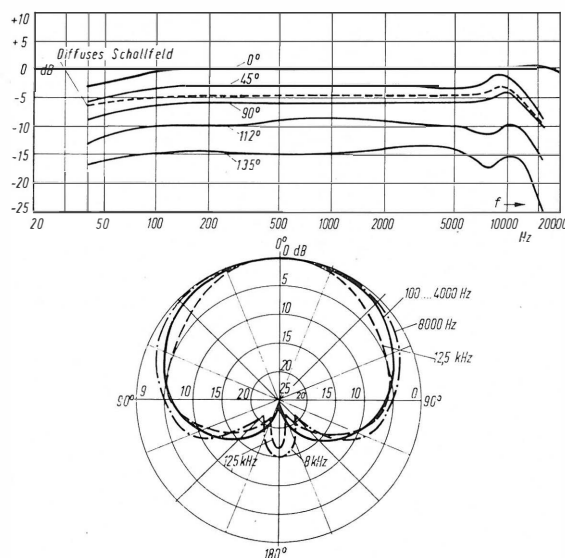


Bild 2

Frequenzgänge und Richtdiagramme eines kleinen Druckgradientenmikrofons mit Nierencharakteristik (entnommen aus [29])

6. Bisher gibt es keine Untersuchungen darüber, in welchem Maße der indirekte Schallanteil im Verhältnis zum direkten Anteil das Klangbild bestimmt. Zwei Aussagen lassen sich aber zu diesem Punkt aus der Praxis gewinnen:

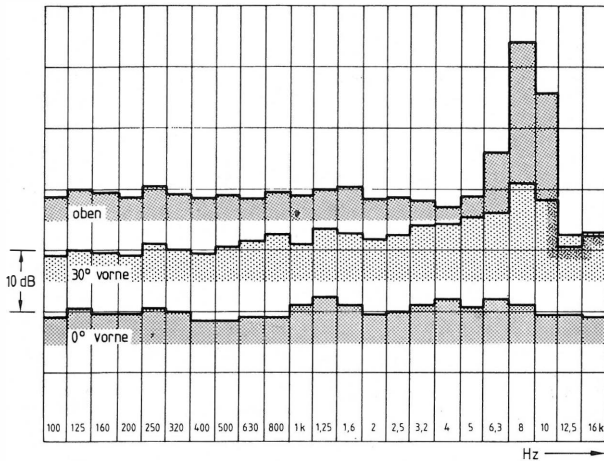
a) Von Studiomikrofonen wird gefordert, daß ihr Freifeld- und ihr Diffusfeldfrequenzgang annähernd parallel verlaufen. Nur dann läßt sich die Hallbalance durch Änderung des Mikrofonabstandes verändern, ohne daß sich zugleich auch die Klangfarbe ändert. **Bild 2** zeigt als Beispiel Richtdiagramme und Frequenzgänge eines gebräuchlichen Studiomikrofons, das diese Anforderung besonders gut erfüllt.

b) Der Abstand des Kunstkopfes zur Schallquelle ist in der Praxis größer, als dies bei Einsatz eines normalen Koinzidenzmikrofons üblich ist. Der indirekte Schallanteil hat deshalb bei Kunstkopfaufnahmen (besonders bei Musikaufnahmen) ein sehr großes Gewicht bezüglich der Klangfarbe.

Man erkennt, daß der Diffusfeldfrequenzgang des Kunstkopfes das entscheidende Kriterium für eine klangfarbengerechte Entzerrung der Kunstkopfsignale darstellen kann.

Aus dem oben Gesagten ergibt sich folgendes Bild: In der Summe aller richtungsspezifischen linearen Verzerrungen steckt ein gemeinsamer Anteil, der in erster Linie hinsichtlich guter Klangfarbeneigenschaften bei Lautsprecherwiedergabe, in zweiter Linie hinsichtlich ausreichender Kompatibilität mit dem standardisierten freifeldentzerrten Kopfhörer optimal entzerrt werden muß.

Die Freifeldentzerrung für frontalen Schalleinfall ist ungeeignet. Auch diverse andere Bezugsrichtungen ergeben zwar größtenteils etwas bessere Entzerrungen, doch zeigt schon eine Analyse der Freifeldübertragungsfunktionen, daß richtungsspezifische Senken im Amplitudenfrequenzgang – ähnlich der beschriebenen 8-kHz-Senke – praktisch immer vorhanden sind [21]. Eine genaue Entzerrung von richtungsspezifischen Senken, die tiefer sind als 5 dB, führt zu störenden Klangfarbenfehlern. Hörversuche, die mit verschiedenen Freifeldentzerrungen (0° vorne, 30° vorne, 90° seitlich, 180° hinten, oben) durchgeführt wurden, zeigten keine befriedigenden Resultate. Im Vergleich zum Koinzidenzmikrofon waren Klangfarbenfehler nicht nur bei Rauschsignalen, sondern auch bei Konzertaufnahmen unterschiedlich stark hörbar. Hierzu zeigt **Bild 3** die Terzspektren eines 0°-freifeldentzerrten Kunstkopfes bei Beschallung von vorne (0° und 30° und von oben). Man erkennt den großen Einfluß der Richtcharakteristik auf das Spektrum, das heißt, auch den großen Einfluß der Wahl der Bezugsrichtung auf die Klangfarbe. Terzmessungen wurden gewählt, weil eine detaillierte Freifeldentzerrung nicht nur unsinnig ist (es geht nur um die Klangfarben!), sondern eher schädlich (schmale Senken im Frequenzgang sind meistens sehr richtungsspezifisch, das heißt, ihr Ausgleich stört bei anderen Schalleinfallsrichtungen). Möglichst genau muß lediglich auf der Wiedergabeseite die zur Kunstkopfentzerrung „passende“ Kopfhörerentzerrung sein (Individualentzerrung [7, 8]).



**Bild 3**

Terzspektren der Freifeldübertragungsmaße für den 0°-freifeldentzerrten Kunstkopf nach [1] bei drei verschiedenen Schalleinfallrichtungen

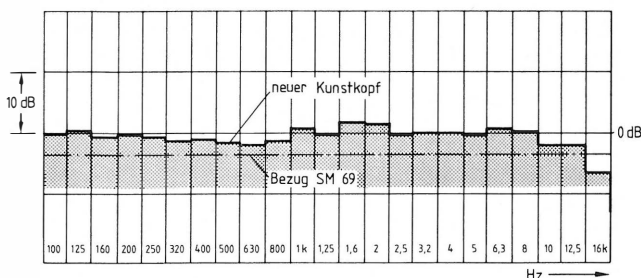
#### 4. Die Diffusfeldentzerrung

##### 4.1. Wirkung bei Lautsprecherwiedergabe

Man könnte auf die Idee kommen, zunächst eine günstige Freifeldentzerrung zu wählen, sie aber im Sinne eines befriedigenden Klangeindrucks zu optimieren (Abkehr vom Prinzip „Freifeldentzerrung“). Realisiert man beispielsweise die Freifeldentzerrung für frontalen Schalleinfall, ohne die 8-kHz-Senke zu berücksichtigen, so verbessert sich das Klangbild wesentlich: Die schädliche Anhebung im 8-kHz-Bereich wird vermieden. Es hat sich aber gezeigt, daß derartige Manipulationen immer dazu führen, daß der Diffusfeldfrequenzgang des Kunstkopfes geglättet wird. Auch mit diesem Ansatz kommt man also zu der Erkenntnis, daß offenbar der ebene Diffusfeldfrequenzgang eine klanggetreue Lautsprecherwiedergabe gewährleistet.

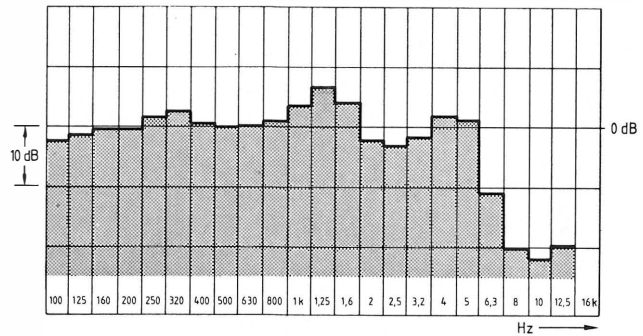
Der neue Kunstkopf wurde deshalb diffusfeldentzerrt, genauer, er liefert im Diffusfeld den gleichen Frequenzgang [30] wie ein in der Studioteknik gebräuchliches Stereomikrofon.

Den Diffusfeldfrequenzgang des verbesserten Kopfes KU 80 (er enthält die „typische“ Richtcharakteristik nach [1] und eine zweckdienliche Ankopplung der Ohrmuschel an das bewährte Mikrofon KM 83 nach [20]) gibt **Bild 4** wieder. Der Diffusfeldfrequenzgang ist bezogen auf denjenigen des Stereomikrofons SM 69 (Neumann); die Abweichungen vom Referenzmikrofon sind vernachlässigbar. Ein Klangfarben-



**Bild 4**

Terzspektrum des Diffusfeldübertragungsmaßes für den diffusfeldentzerrten Kunstkopf mit Richtcharakteristik nach [1], bezogen auf das Stereomikrofon SM 69



**Bild 5**

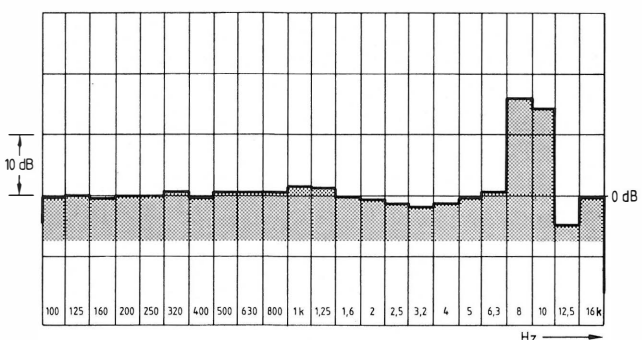
Terzspektrum des Diffusfeldübertragungsmaßes für den Kunstkopf KU 80

vergleich mit weißem Rauschen im Hallraum, aber auch im Konzertsaal oder in anderen Räumen bringt keine nennenswerten Unterschiede. Bisher wurden in der Praxis auch keine störenden Klangfarbenfehler festgestellt, wenn der Direktschall dominiert (Aufnahmeentfernung kleiner als Hallradius, Außenaufnahmen).

Zunächst haben diverse Demonstrationen der Lautsprecherkompatibilität vor vielen Fachleuten des Hörfunks nahezu uneingeschränkt Beifall gefunden. Musikaufnahmen aus verschiedenen Konzertsälen wurden dabei mit den entsprechenden intensitätsstereofonen Aufnahmen verglichen; die Klangfarben erwiesen sich als gleichwertig, vielleicht wegen der größeren Aufnahmeentfernung beim Kunstkopf sogar ausgewogener.

Die Lautsprecherkompatibilität des neuen diffusfeldentzerrten Kunstkopfes wurde auch verglichen mit derjenigen des alten Kopfes KU 80 und mit derjenigen des neuen, aber freifeldentzerrten Kopfes nach [1, 8]. Die Klangfarben korrespondieren sehr gut mit den dazugehörigen Diffusfeldfrequenzgängen: **Bild 5** gibt die Wirkung des 6-kHz-Tiefpasses am KU 80 deutlich wieder, und in **Bild 6** erkennt man die fatale Wirkung der Entzerrung der 8-kHz-Senke, wie sie im Freifeld bei frontalem Schalleinfall auftritt.

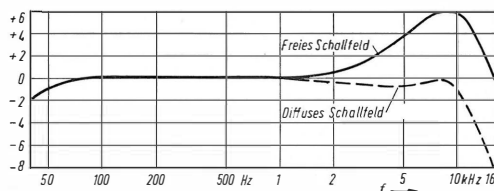
Es hat sich erwiesen, daß das meßtechnisch klar definierte Kriterium „ebener Diffusfeldfrequenzgang“ sehr gut mit der Eigenschaft „hohe Klangfarbentreue“ korrespondiert. Das gilt nicht für das ebenso klar definierte Kriterium „ebener Freifeldfrequenzgang mit bestimmter Bezugsrichtung“.



**Bild 6**

Terzspektrum des Diffusfeldübertragungsmaßes für den 0°-freifeldentzerrten Kunstkopf nach [1]

Diese Erkenntnis hat übrigens nicht nur für die Entzerrung des Kunstkopfes Gültigkeit. Auch beim Bau von Mikrofonen, die als reine Druckempfänger arbeiten, stimmen bekanntlich Freifeld- und Diffusfeldfrequenzgang niemals überein. In vielen Fällen trägt man auch hier der Bedeutung des Diffusfeldfrequenzgangs durch einen möglichst ebenen Verlauf Rechnung, und man nimmt dafür im Freifeldfrequenzgang einen Anstieg im oberen Frequenzbereich in Kauf [29] (vgl. **Bild 7**). (Dies gilt natürlich nicht für Spezialmikrofone, die vorwiegend im Nahbereich der Schallquelle eingesetzt werden oder die einen bestimmten „sound“ erzielen sollen.)

**Bild 7**

Frequenzgang des Diffusfeld- und Freifeldübertragungsmaßes für ein kleines Druckmikrofon  
(entnommen aus [29])

Allgemein bevorzugt man auf der Aufnahme- und Wiedergabe- seite, die mit der Diffusfeldentzerrung definiert ist, gewährleistet hinsichtlich der Klangfarbe Kompatibilität unter den verschiedenen Mikrofonarten – einschließlich „Kunstkopfmikrofon“.

#### 4.2. Wirkung bei Kopfhörerwiedergabe

Die Freifeldanpassung des Kunstkopfsignals stellt eine ungeeignete Entzerrung für die Lautsprecherwiedergabe dar, doch sie stimmt überein mit der standardisierten Kopfhörerentzerrung. Umgekehrt stellt die Diffusfeldanpassung eine geeignete Entzerrung für die Lautsprecherwiedergabe dar, doch sie stimmt nicht überein mit der standardisierten Kopfhörerentzerrung. Eine „Universalschnittstelle“ zwischen Aufnahme- und Wiedergabeseite scheint nach dieser Bilanz also nicht möglich zu sein.

Bisher ist aber nur die mangelnde Lautsprecherkompatibilität der freifeldentzerrten Kunstkopfsignale erwiesen, nicht jedoch die mangelnde Standardkopfhörerkompatibilität der diffusfeldentzerrten Kunstkopfsignale. Es wurde bereits in Abschnitt 3 (Punkt 1) darauf hingewiesen, daß die tatsächliche Diskrepanz zwischen Kunstkopf- und Kopfhörerentzerrung möglicherweise klein genug ist und zusätzliche Abbildungsfehler kaum oder gar nicht auftreten.

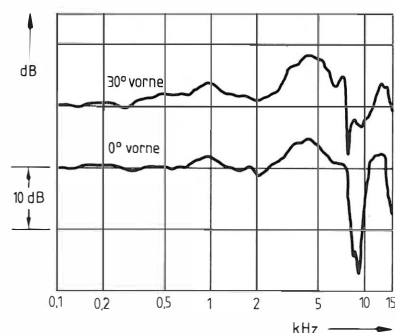
Um einen Überblick über die tatsächlichen Verhältnisse zu gewinnen, wurden die diffusfeldentzerrten Signale des verbesserten Kopfes mit 25 verschiedenen Kopfhörern abgehört und bezüglich der Abbildungseigenschaft beurteilt. In die „engere Wahl“ kamen 8 Kopfhörer, mit denen zwei Beurteilungstests, einer bezüglich Lokalisation und einer bezüglich Klangfarbe, durchgeführt wurden (12 Versuchspersonen). Deutlich bevorzugt wurde der DT 440

(Beyer). Dieses Verfahren hatte gegenüber einer Messung der jeweils verbleibenden Diskrepanz den Vorteil, daß direkt die resultierenden Abbildungseigenschaften verglichen wurden. Ein Vergleich der verbleibenden linearen Verzerrungen wäre weniger aussagekräftig.

Ein Vergleich des „vollständig entzerrten“ Kunstkopfsystems (freifeldentzerrter Kopf nach [1] plus freifeldkorrigierter Kopfhörer HD 414 nach [1]) mit dem „unvollständig entzerrten“ Kunstkopfsystem (diffusfeldentzerrter Kopf nach **Bild 4** plus unkorrigierter Kopfhörer DT 440) brachte keine nennenswerten Unterschiede bezüglich der Lokalisation. Bezüglich der Klangfarbe waren Unterschiede wahrnehmbar, vor allem erschien aber das freifeldangepasste System etwas höhenbetont („spitz“).

Die diffusfeldangepassten Kunstkopfsignale ermöglichen demnach bei Wiedergabe über den unkorrigierten Kopfhörer DT 440 nahezu die gleiche Lokalisation wie bei Wiedergabe über einen diffusfeldkorrigierten Kopfhörer DT 440. Dies wurde weiter deutlich bei der Entwicklung des Diffusfeldkorrekturfilters:

**Bild 8** zeigt die Freifeldübertragungsfunktion des diffusfeldentzerrten Kunstkopfes entsprechend **Bild 4** für die Schalleinfallrichtungen vorne  $0^\circ$  und schräg vorne  $30^\circ$ . Kennzeichnend ist vor allem die nicht entzerrte 8-kHz-Senke bei Schalleinfall von vorne. Da ein für vorne freifeldentzerrter Kunstkopf einen ebenen Verlauf dieser Übertragungsfunktion aufweisen würde, stellt die Freifeldübertragungsfunktion des diffusfeldentzerrten Kopfes für vorne zugleich die Diskrepanz der beiden Entzerrungen „Freifeld vorne“ – „Diffusfeld“ dar. Eine entsprechende Korrekturfilterkurve ist in **Bild 9** eingetragen (gestrichelt); sie wäre erforderlich, wenn der benutzte Kopfhörer ideal freifeldentzerrt wäre. Doch die notwendige Korrekturfilterkurve für ein ebenes Freifeldübertragungsmaß des DT 440 zeigt ebenfalls **Bild 9** (durchgezogene Linie nach [5]); sie verläuft schon ziemlich genau invers zur Kurve des Freifeld-Diffusfeldkorrekturfilters im Bereich zwischen 3 und 10 kHz. Die für den DT 440 verbleibende notwendige Restentzerrung gibt **Bild 10** wieder. Daraus geht hervor, daß wahrscheinlich nur im mittleren Frequenzbereich eine Korrektur vorzunehmen ist, im oberen Frequenzbereich bleiben die geringen linearen Verzerrungen sicher ohne nennenswerten Einfluß. Feh-

**Bild 8**

Frequenzgänge der Freifeldübertragungsmaße für den diffusfeldentzerrten Kunstkopf mit Richtcharakteristik nach [1] bei zwei verschiedenen Schalleinfallrichtungen



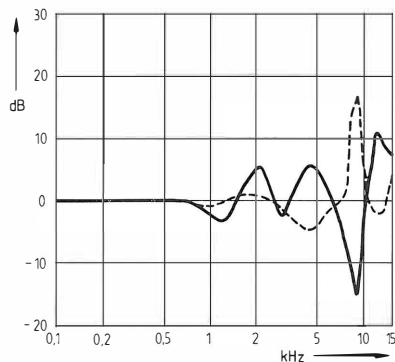


Bild 9

Frequenzgang des Freifeldanpassungsfilters für den diffusfeldentzerrten Kunstkopf mit Richtcharakteristik nach [1] (gestrichelte Kurve, vgl. Bild 1 und Bild 8) und Frequenzgang des Freifeldkorrekturfilters für den Kopfhörer DT 440 nach [5] (durchgezogene Kurve, vgl. Bild 1)

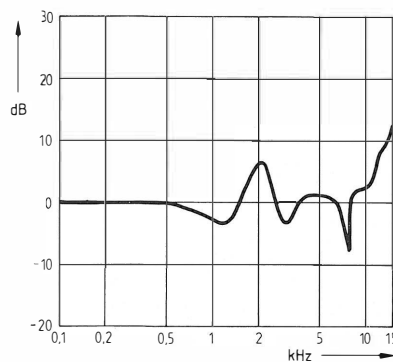


Bild 10

Frequenzgang des Korrekturfilters für die genaue Restentzerrung der Übertragungsstrecke diffusfeldentzerrter Kunstkopf — Kopfhörer DT 440 (entnommen aus Bild 9)

ler, die durch die Streuung des individuellen Freifeldübertragungsmaßes eines Kopfhörers auftreten, können im oberen Frequenzbereich viel größer sein [36, 37, 38].

Dieses überraschende Ergebnis erklärt zunächst die geringfügigen Abbildungsfehler bei Wiedergabe der diffusfeldentzerrten Kunstkopfsignale über den unkorrigierten Kopfhörer DT 440. Weiter läßt es den Schluß zu, daß der DT 440 im Frequenzbereich von 3 bis 10 kHz recht gut diffusfeldentzerrt ist; die 8-kHz-Senke – das kennzeichnende Merkmal für die Schalleinfallrichtung „vorne“ – wird vom DT 440 nicht reproduziert.

## 5. Problematik der standardisierten Kopfhörerentzerrung

An dieser Stelle soll kurz auf eine wichtige Konsequenz für die Kopfhörerentzerrung eingegangen werden, die in [39] beschrieben wird und die sich aus neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen auf dem Gebiet des räumlichen Hörens ergibt [24].

Das räumliche Hören basiert im Lokalisationsmodell nach [24] auf einem Mustererkennungsprozeß, der mit einer assoziativen Reizverarbeitung ermöglicht wird. Die Lokalisation setzt deshalb eine Schallquelle voraus, die die Entfernungswahrnehmung ausreichend gewährleistet. Dies ist der Fall, wenn spektrale Merkmale des aktuellen Reizes auswertbar sind. Die Lokalisation, das heißt die Ortung einer Schallquelle außerhalb des Kopfes erfordert einen hinreichend breitbandigen Reiz.

Das Meßverfahren, das für die Bestimmung des Freifeldübertragungsmaßes von Kopfhörern nach DIN 45 619 [40] vorgeschrieben ist, sieht eine schmalbandige Schallquelle vor den Versuchspersonen als Lautstärkereferenz vor, denn man will erreichen, daß die Freifeldübertragungsfunktion des menschlichen Kopfes für frontalen Schalleinfall möglichst genau vom Kopfhörer nachgebildet wird.

Je genauer man jedoch das Meßverfahren nach DIN 45 619 befolgt, desto gravierender gilt folgender Einwand: Das breitbandige Spektrum der Signale, die für Lautsprecherwiedergabe bestimmt sind, erfährt durch das Freifeldübertragungsmaß des Kopfhörers eine Bewertung. Diese Bewertung wird zwar aus der Wirkung der menschlichen Richtcharakteri-

stik im freien Schallfeld abgeleitet, doch die Nachbildung geschieht viel zu ungenau, als daß das Gehör diese spektralen Merkmale tatsächlich im Lokalisationsprozeß auswerten könnte. Die Genauigkeit ist selbst für ein Monosignal völlig unzureichend. Wäre sie ausreichend, so würde der Lokalisationsprozeß stattfinden, das Hörereignis würde außerhalb des Kopfes auftreten [41, 42]. Bei Wiedergabe von intensitätsstereofonen Signalen jedoch ist dies mit einer einfachen Entzerrung auch theoretisch nicht erreichbar [43]. Das bedeutet aber, daß die spektralen Merkmale der Ohrsignale, die der freifeldentzerrte Kopfhörer verursacht, entsprechende Klangfarbenfehler zur Folge haben [24, 39].

Den Herstellern von Kopfhörern ist die „Klangfarbenschwäche“ der exakt freifeldentzerrten Kopfhörer bekannt. Man versucht noch heute, durch entsprechende Erweiterung des Toleranzfeldes der DIN 45 500 ein besseres Klangbild zu ermöglichen (vgl. z. B. [44]). Größere Toleranzen sind aber, besonders in Hinblick auf die Kunstkopfstereofonie, genau der falsche Weg. Vielmehr muß die optimale Kopfhörerentzerrung neu festgelegt werden, damit das **Toleranzfeld** der vorgeschriebenen Entzerrung endlich **enger** gefaßt werden kann.

Es wird in [39] vorgeschlagen und theoretisch begründet, die Entzerrung des Kopfhörers ganz äquivalent zur Aufnahmezeit auf das Diffusfeld zu beziehen. Messungen an Kopfhörern [1, 5, 36, 45, 46] weisen schon darauf hin, daß die Toleranzen der Freifeldentzerrung gerne in Richtung Diffusfeldentzerrung ausgenutzt werden. Dies trifft besonders deutlich beim DT 440 zu.

## 6. Ergebnis

Die Weiterentwicklung des Kunstkopfes KU 80 in Hinblick auf verbesserte Klangfarbe bei Lautsprecherwiedergabe hat die folgenden Erkenntnisse gebracht:

1. Der Kunstkopf läßt sich als Stereomikrofon mit stark frequenzabhängiger Richtcharakteristik auffassen.
2. Ein normales Studiomikrofon besitzt ein möglichst frequenzunabhängiges Diffusfeldübertragungsmaß. Dies gewährleistet auch für den Kunstkopf minimale Klangfarbenfehler.

3. Die Diffusfeldanpassung der Kunstkopfsignale ergibt nur sehr geringfügige Abbildungsfehler bei Wiedergabe über den Kopfhörer DT 440.
4. Die Freifeldentzerrung des Kunstkopfes ergibt Klangfarbenfehler bei Lautsprecherwiedergabe von kopfbezogenen Signalen. Korrespondierend dazu führt die Freifeldentzerrung der Kopfhörer zu Klangfarbenfehlern bei Kopfhörerwiedergabe von raumbezogenen Signalen.
5. Es wird deshalb als „Universalschnittstelle“ zwischen Aufnahme- und Wiedergabeseite eine Entzerrung vorgeschlagen, die sich grundsätzlich auf das Diffusfeld bezieht.

Die erzielten Kompatibilitätseigenschaften des diffusfeldentzerrten Kunstkopfes sind überzeugend. Der Kunstkopf kann ohne Einschränkung als Mikrofon (mit besonderen, zusätzlichen Eigenschaften bei Kopfhörerwiedergabe) eingesetzt werden. Das Kunstkopfmikrofon weist im diffusen Schallfeld sogar bessere Abbildungseigenschaften bei Lautsprecherwiedergabe auf als Mikrofone, die vollkommen ohne Laufzeitunterschiede arbeiten [47].

## SCHRIFTTUM

- [1] Hudde, H.; Schröter, J.: Verbesserungen am Neumann-Kunstkopfsystem. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), S. 1 bis 6.
- [2] Theile, G.: „Kunstkopf“ Stereophony: Results of recent investigations and development of a new Kunstkopf system. IBC 80, Brighton, Conf. Publ. No. 191, S. 350 bis 353.
- [3] Theile, G.: Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsabbildung. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), S. 67 bis 73.
- [4] Blauert, J.: Vergleich unterschiedlicher Systeme zur originalgetreuen elektroakustischen Übertragung. Rundfunktech. Mitt. 18 (1974), S. 222 bis 227.
- [5] Platte, H. J.; Laws, P.: Technische Probleme beim Einsatz kopfbezogener stereofoner Übertragungsverfahren. Rundfunktech. Mitt. 22 (1978), S. 22 bis 27.
- [6] Mellert, V.: Die Mikrofonanordnung beim Kunstkopfbau. Bericht über das Vorkolloquium zur DAGA '78 in Bochum. Rundfunktech. Mitt. 22 (1978), S. 196 bis 198.
- [7] Hudde, H.; Schröter, J.: The equalization of artificial heads without exact replication of the eardrum impedance. Acustica 44 (1980), S. 301 bis 307.
- [8] Schöne, P.: Zur Nutzung des Realisierungsspielraums in der kopfbezogenen Stereophonie. Rundfunktech. Mitt. 24 (1980), S. 1 bis 11.
- [9] Schöne, P.: Messungen zur Klangfarbe von Kunstkopfaufnahmen. Hörrundfunk 5. NTG-Fachberichte Bd. 72, VDE-Verlag, Berlin 1980, S. 44 bis 50.
- [10] Blauert, J., u. a.: Wissenschaftliche Grundlagen der kopfbezogenen Stereophonie. Rundfunktech. Mitt. 22 (1978), S. 195 bis 218.
- [11] Kürer, R.; Plenge, G.; Wilkens, H.: Correct spatial sound perception rendered by a special two-channel recording method. 37th AES Convention, New York 1969. Preprint 666 (H-3).
- [12] Wilkens, H.: Kopfbezogene Stereophonie — ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke. Acustica 26 (1972), S. 213 bis 221.
- [13] Wettschureck, R.: Die absoluten Unterschiedsschwellen der Richtungswahrnehmung in der Medianebene beim natürlichen Hören, sowie beim Hören über ein Kunstkopf-Übertragungssystem. Acustica 28 (1973), S. 197 bis 208.
- [14] Wettschureck, R.; Plenge, G.; Lehringer, F.: Entfernungswahrnehmung beim natürlichen Hören sowie bei kopfbezogener Stereophonie. Acustica 29 (1973), S. 260 bis 272.
- [15] DIN 45 500, Teil 10: Heimstudio-Technik (HiFi), Mindestanforderungen an dynamische Kopfhörer nach dem Tauchspulenprinzip. Hrsg. vom Deutschen Normenausschuß, Berlin 1975. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin-Köln.
- [16] Blauert, J.: Wissenschaftliche Grundlagen der kopfbezogenen Stereophonie. Mitteilung während des Kolloquiums zur DAGA '78 in Bochum.
- [17] Blauert, J.: Räumliches Hören. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1974.
- [18] Mehrgardt, S.; Mellert, V.: Transformation characteristics of the external human ear. J. of the Acoust. Soc. Am. 61 (1977), S. 1567 bis 1576.
- [19] Weber, I.; Mellert, V.: Ein Kunstkopf mit „ebenem“ Frequenzgang. Fortschritte der Akustik, VDE-Verlag, Berlin 1978, S. 645.
- [20] Wollherr, H.: Mikrofonankopplung an das Außenohr eines neuen Kunstkopfes. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), in diesem Heft.
- [21] Schröter, J.: Katalog von Außenohrübertragungsfunktionen. Ruhruniversität Bochum, 1980.
- [22] Mellert, V.: Die Normung kopfbezogener Stereo-Aufnahmen und ihre Wiedergabe über Lautsprecher. Fernseh- und Kinetech. 30 (1976), S. 86 bis 88.
- [23] Bloom, P. J.: Creating source elevation illusions by spectral manipulation. J. of the Audio Eng. Soc. 25 (1977), S. 560 bis 565.
- [24] Theile, G.: Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld. Dissertation. Technische Universität Berlin, 1980.
- [25] Damaske, P.; Mellert, V.: Ein Verfahren zur richtungstreuen Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher. Acustica 22 (1969/70) S. 153 bis 162.
- [26] Mayer, N.: Über die Hörbarkeit von linearen Verzerrungen bei natürlichen Klängen. Funk und Ton 1 (1954).
- [27] Bücklein, R.: Hörbarkeit von Unregelmäßigkeiten in Frequenzgängen bei akustischer Übertragung. Dissertation. Technische Hochschule München, 1964.
- [28] Bücklein, R.: The audibility of frequency response irregularities. J. of the Audio Eng. Soc. 29 (1981), S. 126 bis 131.
- [29] Boré, G.: Mikrophone. Schiele & Schön, Berlin 1973.
- [30] DIN 45 591: Mikrofon-Prüfverfahren, Meßbedingungen und Meßverfahren für Typenprüfungen, Punkt 4.1.7. Hrsg. vom Deutschen Normenausschuß, Berlin 1980. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin-Köln.
- [31] Diestel, H. G.: Absolutbestimmung des Übertragungsfaktors von Mikrofonen im diffusen Schallfeld. Acustica 10 (1960), S. 277 bis 280.
- [32] Jecklin, J.: Musikaufnahmen. Franzis-Verlag, München 1980.
- [33] Reichardt, W.: Grundlagen der technischen Akustik. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1968.
- [34] Thiele, R.: Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen. Acustica 3 (1953), S. 201 bis 302.
- [35] Cremer, L.; Müller, H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik I und II. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1978.
- [36] Griese, H. J.: Was ist das „Freifeld-Übertragungsmaß“ eines Kopfhörers. Funkschau 50 (1978), S. 811 bis 812.
- [37] Villchur, E.: Free-field calibration of earphones. J. of the Acoust. Soc. Am. 46 (1969), S. 1527.
- [38] Shaw, E. A. G.; Teranishi, R.: Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source. J. of the Acoust. Soc. Am. 44 (1968), S. 240.
- [39] Theile, G.: Zur Theorie der optimalen Wiedergabe stereofoner Signale über Lautsprecher und Kopfhörer. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), in diesem Heft.
- [40] DIN 45 619, Blatt 1: Kopfhörer; Bestimmung des Freifeld-Übertragungsmaßes durch Lautstärkevergleich mit einer fortschreitenden Schallwelle. Hrsg. vom Deutschen Normenausschuß, Berlin 1975. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin-Köln.
- [41] Laws, P.: Zum Problem des Entfernungshörens und der Im-Kopf-Lokalisiertheit von Hörereignissen. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1972.
- [42] Platte, H. J.; Laws, P.; v. Hövel, H.: Anordnung zur genauen Reproduktion von Ohrsignalen. Fortschritte der Akustik. DAGA 75, Braunschweig. Physik Verlag, Weinheim 1975, S. 361 bis 363.
- [43] Blauert, J.; Laws, P.: Verfahren zur orts- und klanggetreuen Simulation von Lautsprecherbeschallungen mit Hilfe von Kopfhörern. Acustica 29 (1973), S. 273 bis 277.
- [44] Wischgoll, K. J.: Der halboffene Stereokopfhörer. Funkschau 53 (1981), S. 73 bis 74.
- [45] Fastl, H.; Fleischer, H.: Freifeldübertragungsmaße verschiedener elektrodynamischer und elektrostatischer Kopfhörer. Acustica 39 (1978), S. 182 bis 187.
- [46] Stiftung Warentest: Test Kopfhörer. „test“ Zeitschrift der Stiftung Warentest H. 7 (1981), S. 58 bis 63.
- [47] Jecklin, J.: A different way to record classical music. J. of the Audio Eng. Soc. 29 (1981), S. 329 bis 332.

# MIKROFONANKOPPLUNG AN DAS AUSSENORHR EINES NEUEN KUNSTKOPFES<sup>1</sup>

VON HORST WOLLHERR<sup>2</sup>

Manuskript eingegangen am 8. Juli 1981

Kopfbezogene Stereophonie

## Zusammenfassung

Bei bisher verwendeten Kunstkopfsystemen zur Erzeugung kopfbezogener Stereophonie war das angestrebte Ziel die genaue Nachbildung eines menschlichen Kopfes einschließlich der Ohrform, des Ohrkanals und der Eingangsimpedanz des Trommelfelles. Bei der unvollkommenen Realisierung traten elektroakustische Nachteile auf, die unter anderem zu unbefriedigenden Ergebnissen bei der Wiedergabe über Lautsprecher führten.

Nach neueren Erkenntnissen ist jedoch die richtige Abschlußimpedanz des Ohrkanals nicht wichtig. In einer Entfernung von wenigen Millimetern vom Eingang des Außenohrkanals ist jede mechanische oder akustische Maßnahme unschädlich für die korrekte Richtungsabbildung des Kunstkopfes.

Da der Einsatz von kleinen Elektretmikrofonen im Ohrkanal zu unzureichender Aussteuerbarkeit des Mikrofonsystems geführt hat, wurde in der vorliegenden Arbeit der Versuch unternommen, ein Studiomikrofon mit einem Membrandurchmesser von 21 mm an den Außenohrkanal so anzukoppeln, daß der früher aufgetretene Tiefpaßcharakter vermieden und im Übertragungsbereich ein befriedigender Frequenzgang erzielt werden konnte.

## Summary Microphone coupling to the external ear of a new artificial head

The target aimed at in the artificial-head systems utilised up to the present for the production of head-related stereophony, was the exact reproduction of a human head, including the shape of the ear, the auditory canal and the input impedance of the tympanic membrane. When that is not completely achieved, electro-acoustical distortion occurs that may lead to, among others effects, unsatisfactory results in the case of reproduction by way of loudspeakers.

However, according to more recent knowledge, the correct terminating impedance of the auditory canal is not important. At a distance of a few millimetres from the orifice of the external auditory canal, whatever mechanical or acoustical measures are adopted, there results no deleterious influence on correct directional reproduction with the artificial head.

Because the utilisation of small Elektret microphones in the auditory canal resulted in inadequate modulation of the microphone system, an attempt has been made in the present study to couple a studio microphone having a diaphragm of diameter 21 mm to the external auditory canal, in such a manner that the low-pass characteristic obtained previously has been avoided and a satisfactory frequency response over the transmission band obtained.

## Sommaire Couplage des microphones à l'oreille externe d'une nouvelle tête artificielle

Dans les systèmes de tête artificielle utilisés jusqu'à présent pour la réalisation d'une stéréophonie liée à la tête, on s'est efforcé de reproduire exactement la tête humaine, y compris la forme de l'oreille et du canal auriculaire, ainsi que l'impédance acoustique du tympan. Les imperfections donnent lieu à des distorsions électro-acoustiques qui peuvent notamment être responsables de mauvais résultats en cas de reproduction sur haut-parleurs.

D'après des résultats plus récents, l'adaptation d'impédance exacte du canal auriculaire est toutefois sans importance. A une distance de quelques millimètres de l'orifice externe du canal auriculaire, on n'observe aucune influence défavorable sur la reproduction correcte de l'information de direction par la tête artificielle, quelles que soient les mesures mécaniques ou acoustiques adoptées.

L'utilisation de petits microphones à électrets, placés dans le canal auriculaire, entraînait une mauvaise modulation du système et on s'est donc efforcé, dans le cadre de la présente étude, de coupler des microphones dont le diaphragme a un diamètre de 21 mm au conduit auriculaire externe, de manière à éviter la caractéristique passe-bas rencontrée auparavant et à obtenir une réponse en fréquence satisfaisante dans toute la bande transmise.

## 1. Einleitung

Als in der Mitte der sechziger Jahre an mehreren Hochschulinstituten versucht wurde, verschiedene Plätze in einem oder mehreren Konzertsälen von Versuchspersonen beurteilen zu lassen, die nicht durch die Kenntnis der Umgebungssituation beeinflusst werden sollten, bemühte man sich um ein die akustischen Raumeigenschaften übertragendes Aufnahme- und Wiedergabeverfahren. Dabei kam man auf das bereits früher erprobte Verfahren, Mikrofone zu verwenden, die in Kopfnachbildungen am Ort der Trommelfelle angebracht waren, und zur Wiedergabe der aufgezeichneten Signale Kopfhörer zu verwenden.

Da man wegen der drängenden Fragestellung keine Zeit hatte, analytisch vorzugehen und die Bedeutung verschiedener Einzelheiten für das Hörereignis getrennt zu beurteilen, beschritt man den Weg, den Kopf so genau wie möglich nachzubilden. Insbesondere richtete man die Aufmerksamkeit auf die Ohrmuscheln und den äußeren Ohrkanal einschließlich der Abschlußimpedanz, die beim Menschen durch die Eigenschaften des Trommelfelles bestimmt wird.

Insbesondere die richtige Nachbildung der Trommelfellimpedanz stellte erhebliche Schwierigkeiten dar, weil sie einerseits nur indirekt meßbar war – wobei die Meßmöglichkeiten am lebenden Menschen aus verständlichen Gründen eingeschränkt sind – und weil die für einen weiten Frequenzbereich richtige Nachbildung der gefundenen Impedanz mit einer technischen Anordnung durch Platz und Aufwand begrenzt war.

Eine für die gestellte Aufgabe brauchbare Anordnung wurde von der Firma Neumann, Berlin, unter

<sup>1</sup> Der Gegenstand dieses Aufsatzes ist zum Patentschutz angemeldet (unveröffentlichte Patentanmeldung P31 01 264.7).

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Horst Wollherr ist Leiter des Arbeitsbereiches Akustische Meßtechnik/Elektroakustische Wandler im Institut für Rundfunktechnik, München.

der Bezeichnung KU 80 gebaut und vertrieben. Bei dieser Ausführung hat man sich um die richtige Nachbildung der Trommelfellimpedanz dadurch bemüht, daß der Außenohrkanal mit einem Durchmesser von etwa 5 mm sprunghaft auf den Außendurchmesser des bewährten Studio-Kondensatormikrofons KM 83 erweitert und kurz nach dem Querschnittssprung eine mit Absorbermaterial gefüllte Lochscheibe eingefügt wurde.

Dieser Kunstkopf wurde mit Erfolg bei wissenschaftlichen Untersuchungen in Konzertsälen und in einer Anzahl von Produktionen im Wort- und Musikbereich bei verschiedenen Rundfunkanstalten eingesetzt. Aufgetretene Mängel wurden nicht nur auf untypische Kopf- und Ohrgeometrie, sondern auch auf die unvollkommene Nachbildung der Ohrimpedanz zurückgeführt.

Erst in neuerer Zeit haben Hudde und Schröter [1] den Beweis angetreten, daß bei den gegebenen Abmessungen des menschlichen Ohres die Abschlußimpedanz des äußeren Ohrkanals praktisch keine Rückwirkung auf die Empfindlichkeit des Ohres für Schalleinfall aus verschiedenen Richtungen hat<sup>3</sup>. Sie wirkt sich – für alle Richtungen gleichmäßig – lediglich auf den Frequenzgang des Ohrsignals aus, ist demnach ohne Schaden für die Richtungsabbildung elektroakustisch korrigierbar.

Mit den Erkenntnissen von Hudde und Schröter ergeben sich neue Freiheiten bei der Konstruktion eines zur Erzeugung kopfbezogener Stereophonie geeigneten Kunstkopfes. Da bereits einige Millimeter nach dem Beginn des Ohrkanals praktisch nur noch der ebene Wellenmodus existiert, genügt es, hier einen Frequenzgang des Schalldruckes zu erzeugen, der in gleicher Weise an der entsprechenden Stelle im menschlichen Ohrkanal reproduziert werden muß.

## 2. Mikrofonankopplung

### 2.1. Kleine Elektretmikrofone

Im Handel gibt es eine Anzahl kleiner Mikrofonkapseln mit Elektretfolien als Membranen. Da deren schallaufnehmende Fläche vergleichbar ist mit der Querschnittsfläche des Ohrkanals, ist ihr Einbau ohne schädliche Einflüsse auf den Frequenzgang des Übertragungsmaßes der Anordnung an einem dem Ohrkanaleingang nahen Ort sehr günstig.

In mehreren Versuchsausführungen, wie zum Beispiel bei Schöne [2], sind derartige Kunstkopfsysteme mit Elektretkapseln realisiert worden. Hinsichtlich Frequenzgang und Richtungsabbildung haben sich damit auch gute Ergebnisse erzielen lassen.

Abgesehen von Problemen, die im Zusammenhang mit der Wahl der geeigneten Entzerrung aufgetreten sind und hier mit Hinweis auf die Ausführungen von Theile [3] nicht näher erläutert werden sollen, stellte sich heraus, daß zumindest für einen Einsatz im Studiobetrieb die elektroakustische Qualität dieser Kunstkopfsysteme nicht ausreichte. Das betraf einerseits das Eigenrauschen, das insbesondere bei

rauscharmen Aufzeichnungsverfahren unter Verwendung von Kompanern auffällig wurde, und andererseits die nicht ausreichende Aussteuerbarkeit. Bereits bei der Aufnahme von Schallquellen üblicher Lautstärke traten hörbare Verzerrungen auf.

Es zeigte sich auch, daß Versuchspersonen nur sehr bedingt in der Lage sind, von den elektroakustischen Mängeln abzusehen und sich voll auf die gelungene Raumabbildung zu konzentrieren. Die Darbietung wirkt insgesamt unsauber und kann deshalb auch nicht als dem natürlichen Hören vergleichbar beurteilt werden.

### 2.2. Großflächige Studiomikrofone

Deshalb sollte der Versuch unternommen werden, die als beste Lösung gefundenen Ohren [1, 4] bei geeignetem Einbau in die Kopfform des von der Firma Neumann hergestellten Kunstkopfes KU 80 so mit den in diesem Kopf verwendeten Mikrofonen (durch Zwischenstücke, die eine 45°-Umlenkung bewirken, leicht abgewandelte Kondensatormikrofone KM 83) zu verbinden, daß deren hohe elektroakustische Qualität nicht wesentlich beeinträchtigt wird. Dabei kamen elektrische Anhebungen des Übertragungsmaßes in bestimmten Frequenzbereichen nur als letzte Möglichkeit und in geringem Umfang in Frage, weil jede derartige Maßnahme auch die Eigenstörspannungen anhebt und damit der Abstand zwischen den Signal- und Störpegeln verringert wird.

Die erkennbaren Schwierigkeiten lagen darin, daß der Übergang vom Außenohrkanal auf die Mikrofonmembrane Hohlräume und Querschnittsänderungen erfordert, die akustisch wirksam werden und das Übertragungsverhalten des Gesamtsystems frequenzabhängig beeinflussen.

## 3. Möglichkeiten für die Mikrofonankopplung

### 3.1. Reflexionsarm abgeschlossener Kanal

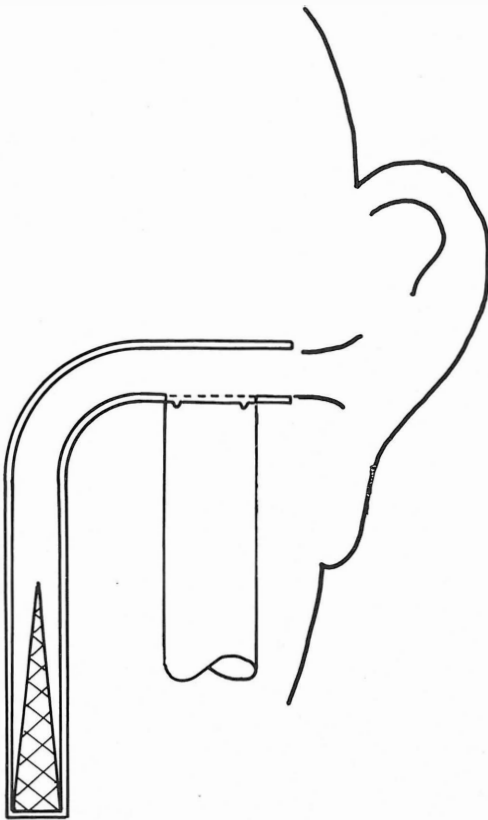
Eine – zumindest in der Theorie diskutierbare – Möglichkeit der Ankopplung besteht darin, daß der Ohrkanal mit gleicher Querschnittsfläche, aber nicht notwendigerweise gleicher Querschnittsform weitergeführt wird und das Mikrofon, wie in **Bild 1** dargestellt, mit seiner Membrane flächenbündig in diese reflexionsarm abzuschließende Ohrkanalverlängerung eingefügt wird.

Bei praktischen Versuchen zeigte sich jedoch, daß man bei vertretbaren Abmessungen keine hinreichend vollkommene Reflexionsfreiheit über den gesamten interessierenden Frequenzbereich erzielen kann. Außerdem können sich bei hohen Frequenzen Wellen quer im Kanal ausbreiten, die wiederum zu frequenzabhängigen Einflüssen auf das Übertragungsverhalten führen. Dennoch ist dieser Weg – insbesondere in Verbindung mit anderen Maßnahmen – nicht aussichtslos.

### 3.2. Akustischer Vierpol

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die akustischen Gesetzmäßigkeiten der bei der Ankopplung unvermeidlichen geometrischen Gebilde zu ergreifen und durch geeignet dimensionierte zusätzliche Anordnungen so zu ergänzen, daß sich ein befriedigendes Übertragungsmaß der gesamten Anordnung ergibt.

<sup>3</sup> Der Autor bedauert, daß er eine Erklärung, die sein Lehrer Professor Cremer bereits vor etwa 15 Jahren in einem Gespräch aufgrund der Abmessungen des Ohrkanals gegeben hat, aus vermeintlich besserem Wissen nicht aufgegriffen hat. Eine Entwicklung hätte abgekürzt werden können.

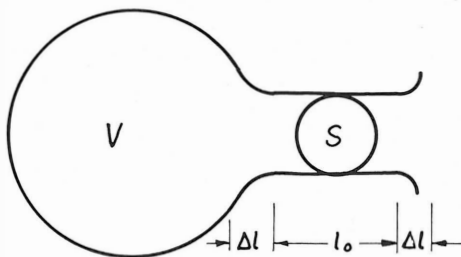


**Bild 1**

Prinzipbild der Mikrofonankopplung unter Verwendung eines reflexionsarm abgeschlossenen Kanals

Sehr nützlich haben sich bei derartigen Problemen Analogiebetrachtungen zwischen akustisch wirksamen Elementen und elektrischen Bauteilen erwiesen, wie sie besonders Reichardt [5] in vollendeter Form entwickelt hat und wie sie bereits auf das Verhalten unterschiedlichster Gebilde angewandt worden sind [6].

Derartige Analogiebetrachtungen führen dazu, daß man Ergebnisse aus der im Zusammenhang mit der elektrischen Nachrichtentechnik entwickelten Filtertheorie sinngemäß übernehmen kann. In Anwendung auf den Kunstkopf bedeutet das, daß man durch Reihen- oder Parallelschaltungen bekannter bzw. berechenbarer Elemente die bei der Verbindung des Mikrofons mit dem Ohrkanal auftretenden Schaltungselemente so ergänzen oder kompensieren kann, daß man ein gewünschtes Verhalten annähern kann.



**Bild 2**

Geometrie eines Helmholtz-Resonators

### 3.2.1. Helmholtz-Resonator

Bei tiefen Frequenzen, also bei Wellenlängen, die groß im Vergleich mit den Abmessungen der betrachteten Anordnung sind, ist das einfachste akustische Element mit ausgeprägter Frequenzabhängigkeit der Helmholtz-Resonator, wie er in **Bild 2** skizziert ist. Da das Volumen  $V$  federnde Eigenschaften aufweist und die in dem Halsstück der Länge  $l_0$  mit dem Querschnitt  $S$  einschließlich der Mündungsbereiche hin und her verschiebbare Luft einen trägen Massenwiderstand darstellt, ergibt sich für die Anordnung das Verhalten eines einfachen Schwingkreises mit der Resonanzfrequenz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa P_0}{\rho}} \sqrt{\frac{S}{V(l_0 + 2\Delta l)}}.$$

Dabei ist

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \text{ (Verhältnis der spezifischen Wärmen),}$$

$P_0$  = atmosphärischer Luftdruck,

$\kappa P_0$  = Volumenkompressionsmodul  
=  $1,4 \cdot 10^5$  Pa bei Normalbedingungen,

$\rho$  = Dichte des Gases (der Luft)  
=  $1,2$  kg/m<sup>3</sup> bei Normalbedingungen,

$V$  = federndes Volumen,

$l_0 + 2\Delta l$  = Länge der verschiebbaren Luftsäule einschließlich der Mündungskorrekturen,

$S$  = Querschnittsfläche der Luftsäule.

Genügend weit unterhalb der Resonanzfrequenz ist der Übertragungsfaktor frequenzunabhängig 1, hat bei der Resonanzfrequenz eine von der Bedämpfung abhängige Überhöhung und fällt bei höheren Frequenzen schnell ab.

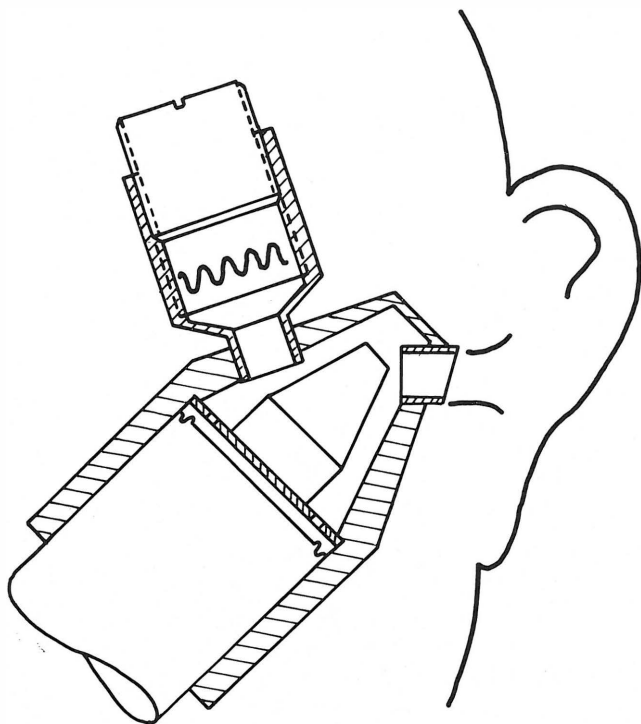
Schließt man ein großflächiges Mikrofon an den Ohrkanal an, ergibt sich vor der Membrane ein unvermeidliches Restvolumen, das zusammen mit der Luftsäule im Ohrkanal im Prinzip einen derartigen Helmholtz-Resonator bildet und eine entsprechende Tiefpaßcharakteristik mit resonanzartiger Überhöhung aufweist. Gelingt es, das Volumen zu verkleinern, kann man den Übertragungsbereich zu hohen Frequenzen hin erweitern. Die Überhöhung im Bereich der Resonanzfrequenz kann durch poröse Materialien im Inneren des Übergangsstückes reduziert werden. Derartige Strömungswiderstände wirken aber nahezu frequenzunabhängig und verringern das Übertragungsmaß auch in dem übrigen Frequenzbereich.

Deshalb ist eine andere Methode vorzuziehen, bei der seitlich an das Volumen ein kleiner Helmholtz-Resonator gleicher Resonanzfrequenz angeschlossen wird. Durch genaue Abstimmung und Bedämpfung dieses bewußt hinzugefügten Resonators kann das Ausmaß und die Frequenzabhängigkeit der Überhöhung des Übertragungsmaßes eingestellt werden. Es ist auch Hintereinanderschaltung mehrerer Helmholtz-Resonatoren möglich, durch die der übertragbare Frequenzbereich auf Kosten eines noch steileren Abfalls bei hohen Frequenzen erweitert werden kann.

### 3.2.2. Längsresonanzen

Bei Frequenzen mit Luftschallwellenlängen, die mit den linearen Abmessungen der betrachteten An-





**Bild 3**  
Schematische Darstellung des Kupplers

ordnung vergleichbar sind, überlagern sich Wellen, die an Querschnittssprüngen reflektiert werden, mit den hinlaufenden Wellen zu komplizierten Interferenzfeldern. Das führt zu stark frequenzabhängigem Übertragungsverhalten. So ist ein einseitig hart abgeschlossenes Rohr gerade dann besonders gut anregbar, wenn seine Länge einem Viertel der Wellenlänge entspricht, und besonders schlecht dann, wenn sie eine halbe Wellenlänge beträgt. Sinngemäß gelten die Überlegungen auch für endliche Einschnürungen oder Erweiterungen von Rohren.

Gestaltet man derartige Diskontinuitäten geschickt, kann man den gesamten Frequenzgang bewußt beeinflussen. Allerdings ist das nur selten auf rein theoretischem Wege möglich, sondern erfordert gründliche Experimente.

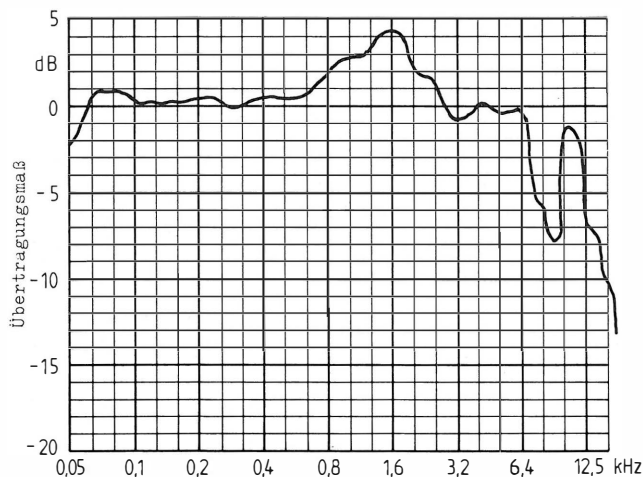
### 3.2.3. Quermoden

Sind die Abmessungen in senkrechter Ausdehnung zur Schallausbreitungsrichtung größer oder gleich der halben Schallwellenlänge in Luft, so ergeben sich zusätzlich typische Querverteilungen des Schalldruckes, sogenannte Wellenmoden. Derartige Schalldruckmuster sind im allgemeinen recht instabil und werden bereits durch geringe Änderungen der Geometrie beeinflusst, was sich wiederum auf das Gesamtverhalten auswirkt.

Der Einfluß der Wellenmoden ist nur bei einfachen geometrischen Formen theoretisch hinreichend exakt zu erfassen.

## 4. Gestaltung des Kupplers

Nach den Erkenntnissen von Hudde und Schröter [1] mußte der Ohrkanal etwa 5 mm lang unverändert erhalten werden. Da für die labormäßige Ausführung die Kopfform und die abgewinkelten



**Bild 4**  
Frequenzgang des KU 81 bei frontalem Schalleinfall

Mikrofone des alten KU 80 verwendet werden sollten, wurde ein in **Bild 3** erkennbares kegelförmiges Übergangsstück über ein unter einem Winkel von  $45^\circ$  eingesetztes kurzes Rohrstück mit dem Ohrkanal verbunden. Der große Hohlraum und der Luftpfropfen in dem verbleibenden Ohrkanalstück haben zu einer Helmholtz-Frequenz von deutlich unter 1000 Hz geführt und damit den übertragbaren Frequenzbereich stark begrenzt. Bereits die Einfügung eines den Hohlraum verkleinernden Innenkegels brachte eine höhere Abstimmung und damit eine deutlich größere Bandbreite. Außerdem wurde der ebenfalls in **Bild 3** erkennbare abstimmbare Helmholtz-Resonator seitlich an den Hohlraum angeschlossen. Mit der Abstimmerschraube konnte dessen Resonanzfrequenz so eingestellt werden, daß die Resonanzüberhöhung bis auf eine Restwelligkeit abgebaut werden konnte. Dazu wurde der Hohlraum mit offenporigem Schaumstoff gefüllt, um dem Abstimmresonator die nötige Bedämpfung zu geben. Absorptionsmaterial im Hals des Kompensationselementes ist wirkungsvoller, aber wegen seiner Wirksamkeit weniger gut zu dosieren.

Da auch nach dieser Maßnahme das Übertragungsverhalten bei hohen Frequenzen nicht voll betriebsfähig war, wurde die zunächst nur als Träger für den Innenkegel gedachte Lochplatte so dimensioniert, daß die in den auf dem Umfang verteilten Löchern hin- und herbewegte Luftmasse mit dem vor der Mikrofonmembrane verbleibenden Restvolumen einen Helmholtz-Resonator ergab, dessen Eigenfrequenz im Bereich des abfallenden Übertragungsmaßes liegt.

## 5. Eigenschaften des neuen Kunstkopfes KU 81

Die Kombination der alten Kopfform des KU 80 mit den von Hudde und Schröter gefundenen Ohren bei Ankopplung der Kondensatormikrofone KM 83 erhielt die Bezeichnung KU 81. Obwohl nach Theile [3] der im Diffusfeld gemessene Frequenzgang die für den Kunstkopf wichtige Beurteilungsgröße ist, wurde bei den Entwicklungsarbeiten der bei frontalem Einfall gemessene Frequenzgang des Übertragungsmaßes herangezogen, weil dessen Messung we-

niger Zeit beansprucht. Allerdings wurde bei dessen Beurteilung der Zusammenhang zwischen den beiden Kurven beachtet. So ist es eine bemerkenswerte Eigenschaft des menschlichen Ohres, daß gerade bei frontalem Einfall bei Frequenzen um 8 kHz ein deutlicher Einbruch auftritt, der bei anderen Winkeln – und damit auch im Diffusfeld – nicht vorhanden ist.

Mit den eingesetzten Mitteln konnten für die vier hergestellten Labormuster des KU 81 Frequenzgänge erzielt werden, die alle der in **Bild 4** dargestellten Kurve sehr ähnlich sind. Die Überhöhung im Frequenzbereich um 1,5 kHz ist bewußt nicht völlig abgebaut worden, weil sie durch zusätzliche elektrische Filter leichter abgebaut werden kann als eine bei weiterer Kompensation auftretende Restwelligkeit.

Messungen im Diffusfeld haben ergeben, daß der KU 81 bei Frequenzen oberhalb 6 kHz um etwa 10 dB empfindlicher ist als der alte KU 80. Erst im Terzbereich um 16 kHz treten starke Absenkungen des Übertragungsmaßes auf, die bei den vorgegebenen Randbedingungen nicht auszugleichen waren.

## 6. Schlußbemerkung

Durch bewußte Gestaltung eines Übertragungsstückes zwischen dem Außenohrkanal und dem Studiomikrofon KM 83 als akustisches Filter war es möglich, nahezu im gesamten interessierenden Frequenzbereich einen so ausgeglichenen Verlauf des Über-

tragungsmaßes zu erzielen, daß ohne Einbuße der elektroakustischen Qualität gewünschte Entzerrungen auf elektronischem Wege erzielbar sind. Insbesondere wurde erreicht, daß eine Diffusfeldentzerrung nur noch geringer Zusatzmaßnahmen bedarf.

Bei Konstruktionen, die weniger an vorhandene Teile gebunden sind, ist mit weiteren Verbesserungen zu rechnen.

Der Verfasser dankt L. Pfister für seine einsatzfreudige und ideenreiche Mitarbeit bei der Herstellung des beschriebenen Mikrofonkupplers.

## SCHRIFTTUM

- [1] Hudde, H.; Schröter, J.: Verbesserungen am Neumann-Kunstkopfsystem. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), S. 1 bis 6.
- [2] Schöne, P.: Kopfbezogene Stereophonie. Funkschau 52 (1980), S. 79 bis 84.
- [3] Theile, G.: Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Klangfarbe. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), in diesem Heft.
- [4] Theile, G.: Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsabbildung. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), S. 67 bis 73.
- [5] Reichardt, W.: Grundlagen der technischen Akustik. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1968.
- [6] Wollherr, H.: Akustische Untersuchungen an Radialventilatoren unter Verwendung der Vierpoltheorie. Dissertation. Technische Universität Berlin, 1973.

ZUR THEORIE DER OPTIMALEN WIEDERGABE VON STEREOFONEN SIGNALEN  
ÜBER LAUTSPRECHER UND KOPFHÖRERVON GÜNTHER THEILE<sup>1</sup>

Manuskript eingegangen am 9. Juli 1981

Kopfbezogene Stereophonie

## Zusammenfassung

Eng verknüpft mit der Weiterentwicklung der kopfbezogenen Stereophonie sind die theoretischen Vorstellungen über die Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören erweitert worden. Sie lassen sich beschreiben mit Hilfe eines neuen Lokalisationsmodells, dem „Assoziationsmodell“. Es basiert auf der Hypothese, daß Assoziationsvorgänge ein Grundprinzip der sensorischen Reizverarbeitung darstellen. Danach resultiert die auditive räumliche Wahrnehmung grundsätzlich aus zwei unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen. Jeder der beiden Verarbeitungsprozesse geschieht auf dem Wege einer assoziativ gesteuerten Musterselektion: Ein aktueller Reiz, welcher von einer Schallquelle herrührt, löst in der ersten Stufe eine Ortsassoziation und in der zweiten eine Gestaltassoziation aus. Beide Stufen bestimmen gemeinsam die Hörereigniseigenschaften.

Die Abhängigkeit der Ohrsignale vom Schallquellenort wird als Form der Codierung räumlicher Information aufgefaßt, deren Kenntnis eine Decodierung der räumlichen Information ermöglicht. Die Decodierung der räumlichen Information leistet die Ortsassoziationsstufe des Modells. Die Wirkung kann mit einem steuerbaren Filter beschrieben werden, dessen Übertragungsfunktion sich infolge der assoziativen Mustererkennung invers verhält zur ortsabhängigen Übertragungsfunktion des Außenohres.

Es zeigt sich, daß dieses Funktionsschema eine einheitliche Erklärung der wichtigen Phänomene des räumlichen Hörens zuläßt. Es ermöglicht eine einfache systemtheoretische Darstellung der gesamten „Übertragungsstrecke“ Schallereignis — Ohrsignal — Hörereignis. Insbesondere für die unterschiedlichen elektroakustischen Übertragungsverfahren läßt sich damit die Auswertung der jeweils wirksamen Ohrsignale leicht übersehen und abschätzen.

Für die optimale Wiedergabe raum- oder kopfbezogener Signale über Lautsprecher oder Kopfhörer ergeben sich verschiedene Konsequenzen. Speziell die Frage nach der Kompatibilität raum/kopfbezogener Signale hat zwei neue Erkenntnisse gebracht: Es läßt sich zeigen, daß

- die Freifeldentzerrung des Kunstkopfes eine im Prinzip falsche Entzerrung darstellt in Hinblick auf Lautsprecherwiedergabe;
- die (standardisierte) Freifeldentzerrung der Kopfhörer eine im Prinzip falsche Entzerrung darstellt in Hinblick auf Wiedergabe der gebräuchlichen intensitätsstereofonen Signale.

Es wird deshalb aus systemtheoretischen Gründen, die sich aus der Wirkungsweise unseres Gehörs ableiten, als „Universalschnittstelle“ zwischen Aufnahme- und Wiedergabeseite eine Entzerrung vorgeschlagen, die sich grundsätzlich auf das Diffusfeld bezieht.

## Summary On the theory of the optimum reproduction of stereophonic signals by way of loudspeakers and headsets

In close relation to the continuing development of head-related stereophony, the theoretical conceptions regarding the function of the ear in the case of spatial hearing have been extended. They may be described by means of a new localisation model, the „association model“. This is based on the hypothesis that the association processes constitute a basic principle of the sensorial stimulation processing. According to this, the spatial auditive perception results basically from two different processes of assimilation. Each of the two assimilation processes occurs by way of an associatively orientated selection of samples: an actual stimulus, derived from a sound source, gives rise in the first stage to a localisation association and in the second stage to a form association. Both stages together determine the characteristics of the hearing event.

The dependence on the location of the sound source of the aural signal is adopted as the form of the coding of the spatial information, the knowledge of which makes possible the decoding of the spatial information. The decoding of the spatial information is dealt with in the localisation association stage of the model. The effect can be represented by means of an adjustable filter whose transfer function, because of the associative sample recognition, is the inverse of the location-dependent transfer function of the external ear.

It is shown that this function scheme makes possible a general explanation of the important phenomena of spatial hearing. It makes possible also a simple system-theoretical representation of the entire „transmission chain“: sound event — ear signal — hearing event. For the different electro-acoustical transmission methods, in particular, the evaluation of the effective ear signal in question may thus be easily observed and interpreted.

For the optimal reproduction of space- or head-related signals by way of loudspeakers or headsets, there are several consequences. The question of the compatibility of space/headrelated signals, in particular, has given rise to two new concepts; it is possible to show that:

- the free-field correction of the artificial head constitutes a correction that is, in principle, wrong as regards reproduction by loudspeakers;
- the (standardised) free-field correction of the headset constitutes a correction that is wrong in principle, as regards the reproduction of the usual intensity-stereophonic signals.

Therefore, for system-theoretical reasons that are based upon the functioning of our sense of hearing, a correction is proposed as a „universal interface“ between the recording and reproduction ends, which relates basically to the diffused field.

## Sommaire Considérations théoriques sur la reproduction optimale de signaux stéréophoniques au moyen de haut-parleurs et d'écouteurs

Les notions théoriques relatives au fonctionnement de l'oreille dans le cas de l'écoute directionnelle ont été étendues, en relation étroite avec les développements en cours dans le domaine de la stéréophonie liée à la tête. On peut décrire ces propriétés par un nouveau modèle dit d'association, basé sur l'hypothèse que les associations constituent une des données fondamentales du traitement des stimulations sensorielles. Dans ces conditions, la perception auditive de l'espace résulte fondamentalement de deux processus d'assimilation différents. Chacun découle d'une sélection d'échantillons orientée associativement. Un stimulus produit par une source sonore donne tout d'abord lieu à une association de localisation, puis dans une seconde étape, à une association de forme et c'est la synthèse de ces deux phénomènes qui détermine les caractéristiques de la perception auditive.

La relation entre l'emplacement de la source sonore et le signal auditif constitue un codage de l'information spatiale dont le décodage permet la localisation. Cette opération correspond à l'étape d'association de

localisation. Son effet peut être représenté par un filtre variable dont la fonction de transfert est l'inverse de celle de l'oreille externe, du point de vue de la localisation, du fait de la reconnaissance associative des échantillons.

On montre que ce schéma de relation fonctionnelle permet de donner une explication générale à l'important phénomène de l'écoute directionnelle et aussi de donner une représentation théorique simple de l'ensemble de la "chaîne de transmission": phénomène sonore, signal auditif, phénomène auditif. La méthode permet notamment d'observer et d'interpréter facilement l'évaluation du signal auditif effectif pour différents systèmes de transmission électro-acoustiques. Il en résulte plusieurs conséquences pour la reproduction optimale par haut-parleurs ou par écouteurs de signaux liés à l'espace ou à la tête. La question de la compatibilité de ces signaux a notamment permis de dégager deux nouvelles notions et on peut démontrer que:

- la correction de champ libre de la tête artificielle est, par principe, erronée en ce qui concerne la reproduction au moyen de haut-parleurs;
- la correction d'espace libre normalisée appliquée aux écouteurs est erronée par principe, du point de vue de la reproduction des signaux en stéréophonie d'intensité normale.

On propose donc une correction appuyée sur des raisons théoriques basées sur le fonctionnement de l'ouïe humaine, ce qui permettrait de définir une "interface universelle" entre la prise de son et la reproduction. Cette correction porte principalement sur le champ diffus.

## 1. Einleitung

Sowohl die Erfahrungen, die man während der letzten 8 Jahre in den Rundfunkanstalten mit der Kunstkopfstereofonie gemacht hat [1, 2, 3], als auch die Erkenntnisse, die man in jüngster Zeit bei der Weiterentwicklung der Kunstkopfstereofonie gewonnen hat [4, 5, 6], zeigen, daß dieses Übertragungsverfahren eine echte Alternative darstellt zur bisher gebräuchlichen Intensitätsstereofonie.

Im Gegensatz zur intensitätsstereofonen Technik ist es das Ziel der Kunstkopftechnik, dem Zuhörer die Hörillusion zu verschaffen, daß er sich am Aufnahmeort befände und dort am akustischen Geschehen unmittelbar teilhätte. Darüber hinaus aber müssen die Kunstkopfsignale aus Kompatibilitätsgründen bei Lautsprecherwiedergabe gleichwertige Ab bildungseigenschaften aufweisen wie entsprechende intensitätsstereofone Signale.

Es hat sich gezeigt, daß die Anforderungen bei der technischen Entwicklung einer rundfunktauglichen kopfbezogenen Stereofonie besonders vielfältige Probleme aufwerfen, Probleme, die überwiegend mit den wichtigen Phänomenen des räumlichen Hörens direkt zusammenhängen: Dazu gehören Phänomene der Lokalisation einer Einzelschallquelle, der Lokalisation im Schallfeld, welches von mehreren Schallquellen hervorgerufen wird (überlagertes Schallfeld), sowie Phänomene der Kopfhörerbeschallung (Lateralisation).

Ferner hat sich gezeigt, daß die bisherigen theoretischen Vorstellungen über die Funktion unseres Gehörs beim räumlichen Hören nicht ausgereicht haben, um die komplexen Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten für die Konzeption eines optimalen stereofonen Übertragungsverfahrens zu nutzen. Zwar sind die vielen Einzelphänomene – oft sehr ausführlich – experimentell untersucht worden, und für den überwiegenden Teil der bekannten Gesetzmäßigkeiten gibt es Modellvorstellungen, die das Gehör in den verschiedenen Funktionen zu beschreiben suchen. Doch die Mehrheit dieser Modelle sind nachrichtentechnische Modelle, welche nur innerhalb ihrer eng begrenzten Gültigkeitsbereiche Aussagen machen über die Beziehungen zwischen bestimmten Ohrsignalmerkmalen und Hörereigniseigenschaften. Es ist wegen der eng begrenzten Gültigkeitsbereiche

aber zweifelhaft, ob sie damit überhaupt Informationen liefern, die das Verständnis über die Funktion des gesamten Auswertungsprozesses beim Hören stereofoner Signale verbessern. Welchen Sinn hat beispielsweise ein Modell nur für das Richtungshören bei raumbezogener Stereofonie, gültig nur im freien Schallfeld, nur für die Horizontalebene, nicht für breitbandige Lautsprecher signale und nicht für die Hörereignisentfernung (vergleiche Wendt [7])?

Dem heute gebräuchlichen intensitätsstereofonen Übertragungsverfahren lag bisher keineswegs eine allgemeingültige Theorie zur „Bildung von Hörereignissen zwischen den Lautsprechern“ zugrunde. Vielmehr hat man die Möglichkeit, durch geeignete Wahl der gegenseitigen Pegeldifferenzen der Lautsprecher signale die Hörereignisrichtung im Winkelbereich der Lautsprecher willkürlich festzulegen, ganz pragmatisch ausgemessen und für die stereofone Übertragung im Hörfunk genutzt. Die Intensitätsstereofonie hat sich ziemlich unabhängig von entsprechenden wissenschaftlichen Untersuchungen entwickelt; sie muß im wesentlichen als technisches Resultat der elektroakustischen Übertragungspraxis angesehen werden.

Für die bisherige Entwicklung der Kunstkopfstereofonie dagegen waren wissenschaftliche Erkenntnisse über die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation entscheidend. Dies betraf das Verständnis über die Auswertung der Ohrsignale hinsichtlich Hörereignisrichtung, -entfernung und -ausdehnung, insbesondere Vorstellungen über die Ursachen der Im-Kopf-Ortung, der Vorne-Hinten-Vertauschung, der Hörereigniselevation. Die entsprechenden Theorien dazu stehen in guter Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen, die auch im Zuge der Kunstkopfforschung gewonnen wurden.

Doch vor allem das bedeutsame Problem der Kompatibilität raum/kopfbezogener Signale hat Fragen aufgeworfen, die sich nicht mehr mit den bekannten speziellen Theorien, jede mit eng begrenztem Gültigkeitsbereich, beantworten lassen. Vielmehr müssen für diesen Problemkomplex gerade die Zusammenhänge unter den verschiedenen Teilaspekten der Lokalisation verstanden werden. Der in dieser Beziehung wichtige Teilaspekt liegt vor, wenn mehrere Schallquellen einem gemeinamen Hörereignis zugeordnet sind, so daß Hörereignisort und Schallquellenorte nicht übereinstimmen, beispielsweise bei Intensitätsstereofonie. Aber es hat sich erwiesen, daß keine der bisher bekannten Theorien zur Intensitäts-

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Günther Theile ist Leiter des Arbeitsbereiches Systeme der Ton-Aufnahme/Wiedergabe im Institut für Rundfunktechnik, München.

stereofonie übertragbar ist auf die Lokalisation einer Einzelschallquelle [8]. Ebenso gibt es keine allgemeine Theorie zur Lokalisation, welche die Hörereigniseigenschaften auch dann einheitlich erklärt, wenn mehr als eine Schallquelle die Beschaffenheit der Ohrsignale bestimmt.

Ein Ansatz für eine allgemeine Theorie zur Lokalisation ergibt sich, wenn die Lokalisation konsequent als Folge eines Wahrnehmungsprozesses angesehen wird, der allein aufgrund der Hörerfahrung möglich ist. Die Hörerfahrung ergibt sich aus den natürlichen Hörbedingungen. Und unter natürlichen Bedingungen erfolgt das Hören vorwiegend im überlagerten Schallfeld. Störschallquellen aller Art, sehr häufig Reflexionen am Boden oder an den Begrenzungsflächen eines Raumes (Spiegelschallquellen), aber auch eine Vielzahl gleichwertiger Schallquellen, beispielsweise verschiedene Sprecher in der Nähe eines Hörers, erzeugen normalerweise Ohrsignale, die in keiner Weise mit dem Elementarfall einer Einzelschallquelle übereinstimmen. Aber das menschliche Gehör ist in der Lage, unter diesen Schallfeldbedingungen „einen sehr sinnvollen Auswahl-, Ordnungs- und Gliederungsprozeß durchzuführen“ [9], so daß trotz der Überlagerung die entsprechenden Hörereigniszustände zustande kommen können. Bekannte Hörphänomene in diesem Zusammenhang sind das „Gesetz der ersten Wellenfront“ [10] und der „Cocktail-party-Effekt“ [11, 12].

In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell für die Lokalisation im überlagerten Schallfeld beschrieben. Es basiert auf dem Ansatz, daß die Lokalisation über einen „Reizmustervergleich zwischen aktuellen Reizen und erlernten Reizmustern“ [9] erfolgt, daß also aufgrund der Hörerfahrung die Hörereigniszustände zustande kommen. Versteht man die Abhängigkeit der Ohrsignale vom Schallquellenort als einen Mechanismus zur Codierung räumlicher Information, so kann die Kenntnis dieser Ohrsignalabhängigkeit als Schlüssel zur Decodierung der räumlichen Information aufgefaßt werden. Im überlagerten Schallfeld stellt sich damit die Lokalisation als Prozeß zur gleichzeitigen Decodierung verschiedener räumlicher Informationen dar. Er gelingt ganz, teilweise oder gar nicht, abhängig von der Anzahl und den Eigenschaften der beteiligten Schallereignisse.

Es zeigt sich, daß die gleichzeitige Decodierung verschiedener räumlicher Informationen im überlagerten Schallfeld auch dann noch gelingen kann, wenn das Schallfeld von den beiden Lautsprechern, die stereofone Signale abstrahlen, hervorgerufen wird [8]. Damit ist das Lokalisationsmodell grundsätzlich geeignet für eine Vorhersage des Hörereignisortes, sowohl für den Fall einer Realschallquelle als auch für den Fall der „Phantomschallquelle“ bei Stereofonie über Lautsprecher.

Die Kompatibilität raum/kopfbezogener Signale war aber nicht nur hinsichtlich des Hörereignisortes zu klären. Besonders problematisch hat sich die Frage der Hörereignisklangfarbe erwiesen. Es hat bisher kein Lokalisationsmodell gegeben, welches die Wirkung der ausgeprägten Richtcharakteristik des Außenohres (bzw. des Kunstkopfes) auf das Leistungsdichtespektrum des Ohrsignals (bzw. des Kunstkopfsignals) im Hinblick auf die Klangfarbe des Hörereig-

nisses berücksichtigt. In der Literatur ist das Klangfarbenphänomen unter dem Aspekt der wirksamen Übertragungsfunktion des Außenohres überhaupt erst in jüngster Zeit beschrieben worden [6, 8, 13]; entsprechende systematische Hörversuche stehen noch aus.

Welchen Einfluß hat der Prozeß der Decodierung der räumlichen Information auf die Klangfarbe des Hörereignisses? Welche Ohrsignalanteile diskriminiert das Gehör für den Ort und/oder für die Klangfarbe des Hörereignisses? Welche Schallereignismerkmale gewährleisten dies?

Es ist zweckmäßig, an dieser Stelle zunächst den Begriff „Schallereignis“ präzise zu definieren. Bisher ist unklar, wie zwei Schallereignisse überhaupt voneinander unterschieden werden sollen. Betrachtet man entsprechend Blauert [15] ausschließlich „die physikalische Seite des Hörvorgangs“, so kann damit allein die Wirkung von Kopf und Außenohren im Schallfeld gemeint sein. Zwei verschiedene, simultane Schallereignisse sind dann aber nur infolge verschiedener räumlicher Merkmale vorhanden (Orte der Schallquellen, Ausbreitungsrichtungen der Schallwellen usw.). Diese Betrachtung erscheint im überlagerten Schallfeld deshalb nicht sinnvoll, weil der Hörvorgang hier wesentlich durch die Diskriminierbarkeit einzelner Signalanteile gekennzeichnet ist: Zwei räumlich getrennte Lautsprecher z. B. können – abhängig von den Eigenschaften der Sendesignale – entweder zwei simultane Hörereignisse an verschiedenen Orten oder ein einziges Hörereignis an einem dritten Ort erzeugen; weiterhin kann ein einziger Lautsprecher, der zwei „unterschiedliche Sendesignale“ abstrahlt, zwei simultane Hörereignisse erzeugen. Die Auswertungsprozesse im Gehör, die zur Bildung des Hörereignisortes und der Hörereignisgestalt führen, bestimmen stets gemeinsam die Hörereigniseigenschaften; sie beeinflussen sich scheinbar gegenseitig. Die physikalische Seite der Lokalisation ist erst mit Schallereignissen beschreibbar, die sich nicht allein hinsichtlich räumlicher Merkmale gegeneinander abgrenzen lassen. Im folgenden gilt deshalb für den Begriff folgende Definition:

**Ein Schallereignis** ist derjenige Schallanteil, der von einer Einzelschallquelle herrührt und der die Eigenschaft des zugeordneten Hörereignisses hinsichtlich Ort oder Gestalt bestimmt oder beeinflusst.

Wird unter Hörereignis nach Blauert [16] allgemein die „zeitlich, räumlich und eigenschaftlich“ bestimmte auditive Wahrnehmung verstanden, so ergibt sich damit für den Begriff „Lokalisation“ eine Definition, die auch für das überlagerte Schallfeld ausreicht:

Die **Lokalisation** ist das Zuordnungsgesetz zwischen dem Ort eines Hörereignisses außerhalb des Kopfes und bestimmten Merkmalen eines oder mehrerer Schallereignisse.

Das neue Lokalisationsmodell wird „Assoziationsmodell“ genannt. Es entspricht der Auffassung, daß die Wirkungsweise des Gehörs beim räumlichen Hören weniger in abgegrenzten Teilbereichen, sondern sinnvoller „ganzheitlich“ untersucht und verstanden werden kann. Es vermeidet bewußt das in der Nach-



richtentechnik übliche Bestreben, beobachtete Verknüpfungen zwischen Schall- und Hörereignismerkmalen sogleich als Gesetzmäßigkeit bzw. mit Hilfe eines Funktionsmodells zu formulieren (woraus sich die Notwendigkeit zur präzisen Abgrenzung ergibt). Vielmehr trägt es der Erkenntnis Rechnung, daß gerade die Grenzen der Gültigkeitsbereiche sowie mögliche Zusammenhänge einzelner Hörphänomene von besonderem Interesse sein müssen, ebenso verstärkt die Erkenntnisse aus anderen Wissenschaftszweigen, beispielsweise der Neurophysiologie und der Wahrnehmungsforschung. In dieser Hinsicht kann die Anwendung der assoziativen Speichertechnik und Signalverarbeitung neue Möglichkeiten schaffen.

## 2. Das Assoziationsmodell

Das Assoziationsmodell basiert auf der Hypothese, daß Assoziationsvorgänge ein Grundprinzip der sensorischen Reizverarbeitung darstellen. Im sensorischen System entspricht der hypothetische Assoziationsvorgang der Funktion eines hochwirksamen Filters zur Informationsreduktion, welche zwischen peripherer Rezeption und bewußter Wahrnehmung stattfindet. Gespeicherte Assoziationsmuster, die aufgrund früherer Erfahrungen geprägt werden, bewirken einerseits eine sinnvolle Informationsselektion. Andererseits ermöglichen sie, trotz reduzierter Information die streng determinierten Reizkonfigurationen der Umwelt mit ausreichender Genauigkeit zu erkennen [17, 18].

Können wegen mangelnder Erfahrung, fehlender Adaption oder aus organischen Gründen keine Assoziationen gebildet werden, entstehen anstelle bewußter Wahrnehmungen nur bedeutungslose Empfindungen. Man kennt diese Erscheinung in der Neurophysiologie. Eine Ausschaltung der sogenannten Assoziationsfelder im sensorischen System hat Wahrnehmungsstörungen zur Folge, und zwar fehlt die Fähigkeit, die Sinnesindrücke, die empfunden werden, zu erkennen (Agnosie). Agnosien können sich beim Menschen für verschiedene Sinnesmodalitäten entwickeln. Wird z. B. das akustische Assoziationsfeld (im linken Temporallappen) zerstört, so geht unter anderem das Sprachverständnis verloren. Obwohl der Betroffene noch hören kann, bleibt ihm die Bedeutung des Signals verborgen. Es ist allerdings nicht bekannt, ob sich ebenso die Lokalisationsfähigkeit unterbinden läßt (ein derartiger physiologischer Nachweis einer „Ortsassoziation“ wäre sehr aufschlußreich).

Die Bedeutung von Assoziationsprozessen für bewußte Wahrnehmungen führt auf eine sinnvolle Möglichkeit, die Begriffe „Empfindung“ und „Wahrnehmung“ terminologisch zu trennen:

**Empfindungen** sind die durch Reize ausgelösten, nicht weiter gliederbaren Sinnesereignisse, die sich gegenüber Lernvorgängen und bewußten oder unbewußten Interpretationen invariant verhalten; sie kommen nicht durch Assoziationen zustande.

**Wahrnehmungen** sind die durch Reize ausgelösten Sinnesereignisse, die infolge der Sinneserfahrung der Außenwelt zugeordnet auftreten und die deshalb durch Lernvorgänge und bewußte oder unbewußte Interpretationen beeinflusst werden können; sie kommen durch Assoziationen zustande.

Aus dieser Abgrenzung folgt für die Entwicklung von Perzeptionsmodellen, daß grundsätzlich geklärt sein sollte, ob ein Empfindungs- oder Wahrnehmungsmodell den Prozeß beschreiben soll bzw. kann.

Das Grundproblem bei der Untersuchung von Wahrnehmungsvorgängen ist damit die erforderliche Abgrenzung. Hier liegen Fehlerquellen, weil ohne Kenntnis des gesamten Zusammenhanges nicht entschieden werden kann, ob oder mit welcher Einschränkung aus dem Wahrnehmungsprozeß bestimmte Teilbereiche herausgelöst beschrieben werden können.

Es ist mit Vorbehalt wohl möglich, das räumliche Hören abgetrennt von der visuellen Wahrnehmung zu betrachten. Doch wie läßt sich begründen, das Richtungshören abgetrennt vom Entfernungshören zu betrachten? Richtung und Entfernung sind nur Koordinaten des Hörereignisortes; es gibt keine Richtung ohne Entfernung. Ein Modell für das Richtungshören ist kein Wahrnehmungsmodell, es beschreibt deshalb nicht zwangsläufig eine spezielle Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören. Ebenso fragwürdig ist die Untersuchung der Lokalisation mit Tönen: Wie könnte das Gehör die Entfernung einer Schallquelle, die einen reinen Ton abstrahlt, bestimmen?

Bei dem zu beschreibenden Lokalisationsmodell wird davon ausgegangen, daß Richtung und Entfernung untrennbare Größen der räumlichen Wahrnehmung sind. Auffällig ist, daß auf dem Gebiet der visuellen Wahrnehmung viele echte Wahrnehmungsmodelle bekannt sind, dagegen für das Hören kaum. Das ist aus neurophysiologischer und informationstheoretischer Sicht nicht einzusehen, denn hier bestehen für das Auge und das Ohr, in ihrer Eigenschaft als Nachrichtenempfänger, keine prinzipiellen Unterschiede. Aber es ist aus zwei Gründen verständlich: Erstens besteht für technische Anwendungen der visuellen Wahrnehmungsmodelle (Datenreduktion durch geeignete Quellencodierung für die Bildübertragung, beispielsweise Nachbildung von Mustererkennungsprinzipien mit Hilfe von Klassifikationsprozessen oder adaptiven Filtern) aus kommerziellen Gründen ein wesentlich größeres Interesse. Zweitens sind Mustererkennungs- und Assoziationsprinzipien beim Sehen offensichtlicher vorhanden als beim Hören.

Das Assoziationsmodell ist durch eine **zweidimensionale Reizverarbeitung** wesentlich gekennzeichnet. Die erste Verarbeitungsstufe wird „Ortsassoziationsstufe“ genannt. Sie ist infolge der Hörerfahrung in der Lage, durch Bildung von Ortsassoziationen solche Ohrsignale zu selektieren, welche ausschließlich durch die Wirkung von Kopf und Ohrmuscheln im (überlagerten) Schallfeld miteinander verkoppelt sind. Im folgenden werden diese Ohrsignalanteile als „Lokalisationsreize“ bezeichnet:

Hinreichend breitbandige Ohrsignale oder Ohrsignalanteile an den Trommelfellen oder beiden Ohren bilden zusammen einen **Lokalisationsreiz**, wenn sie sich hinsichtlich der Zeit- und der spektralen Merkmale einem einzigen Schallereignisort zuordnen lassen.

Die Ortsassoziationsstufe ist im Modell einer zweiten, höher gelagerten zentralen Verarbeitungsstufe

vorgeschaltet. Diese sogenannte „Gestaltassoziationsstufe“ enthält die Prozesse, welche die eigenschaftlichen Merkmale des Hörereignisses mit Ausnahme der räumlichen Merkmale bestimmen.

Die konsequente Unterscheidung der beiden Verarbeitungsstufen entspricht völlig den beiden elementaren Bereichen der Hörerfahrung: Die empfangenen Ohrsignale sind zurückzuführen auf die beiden voneinander unabhängigen, stets paarweise auftretenden Schallquelleneigenschaften „Ort“ und „Signal“. Demzufolge sind im Modell die auftretenden Hörereignisse zurückzuführen auf die Wirkung einer ortsbestimmenden und einer gestaltbestimmenden Verarbeitungsstufe.

Beide Stufen müssen durchlaufen werden, damit der Reiz zu einer Wahrnehmung führt. Beide Prozesse bestimmen also stets gemeinsam die Eigenschaften eines Hörereignisses; auch die gestaltbestimmende Verarbeitungsstufe ist damit ein Element des **Lokalisationsmodells**. Man erkennt, daß beispielsweise der oben erwähnte Zusammenhang zwischen Hörereignisort und Hörereignisklangfarbe prinzipiell vom Assoziationsmodell erfaßt wird.

### 2.1. Die Lokalisationsreizselektion

Die Ortsassoziationsstufe des Modells hat die Eigenschaft, einen empfangenen Reiz vorzugsweise als Lokalisationsreiz zu deuten, das heißt sie vergleicht spontan den aktuellen Reiz mit Reizmustern, welche infolge der Erfahrung bestimmten Hörereignisorten zugeordnet sind. Nur ein Lokalisationsreiz führt zur Lokalisation. Er liegt vor, wenn die Ohrsignalmerkmale hinsichtlich Zeit und Spektrum mit der Erfahrung vereinbar sind. Damit ist das Gehör in der Lage, aus einer Summe von Signalen die für einen Schallquellenort charakteristischen Signalanteile zusammenzufassen und geschlossen weiterzuleiten (Lokalisationsreizselektion). „Geschlossen weiterleiten“ heißt dabei: Die Lokalisationsreizselektion läßt sich als Fusionsprozeß interpretieren, welcher die binauralen Signalanteile einer bestimmten Schallquelle untrennbar vereint und mit der umcodierten, zur Wahrnehmung führenden räumlichen Information versieht. Die Lokalisationsreizselektion wirkt im überlagerten Schallfeld als Filter zur gleichzeitigen Diskrimination einzelner Sendesignale.

Diese Funktion der hypothetischen Ortsassoziationsstufe läßt sich wahrscheinlich nicht mit Operatoren nachbilden, die nach unserem heutigen Wissen physiologisch möglich sind. Vielmehr sollen die Leistungsmerkmale dieser Verarbeitungsstufe – soweit wie möglich – mit Mitteln der linearen Systemtheorie beschrieben werden, und in diesem Rahmen auch nur für maximal zwei Schallereignisse beliebiger räumlicher Konstellation. Als grobes Schema wird ein steuerbares Filter angenommen, dessen Übertragungsfunktion sich invers zur ortsabhängigen Übertragungsfunktion des Außenohres verhält. Die Bestimmung der momentan wirksamen Übertragungsfunktion geschieht durch Mustererkennungsprozesse.

#### 2.1.1. Die räumliche Decodierung

Das Gehör besteht aus einem Auswertesystem mit zwei Eingangskanälen. Den Eingangskanälen ist ein gemeinsames lineares Netzwerk vorgeschaltet, dessen Übertragungsfunktion  $M$  sich aus der Wirkung

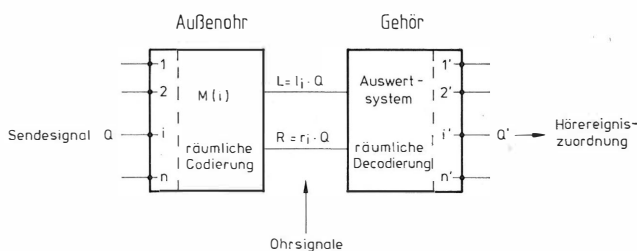


Bild 1

Das räumliche Übertragungssystem des Gehörs

des Kopfes und der Außenohren im Schallfeld ergibt.  $M$  ist eine Funktion des Schallquellenortes  $i$ , welche die Ohrsignale definiert miteinander verknüpft („räumliche Codierung“). Liegt am Eingang  $i$  der Matrix  $M(i)$  ein Sendesignal  $Q$  an, so treten an den Eingängen des Auswertesystems die verknüpften Signale der Form  $l_i \cdot Q = L$  und  $r_i \cdot Q = R$  auf ( $l_i, R_i$  = akustische Übertragungsfaktoren bei Beschallung vom Ort  $i$  für das linke Ohr bzw. rechte Ohr); nach erfolgter räumlicher Decodierung erscheint die Antwort  $Q'$  am zugeordneten Ausgang  $i'$  (Bild 1).

Man kann nun zeigen [19], daß unter bestimmten Bedingungen eine inverse Matrix  $M^{-1}$  existiert, welche die Verknüpfung der Ohrsignale, die infolge der Matrix  $M$  auftritt, wieder vollständig aufhebt. Es ist also im Gehör ein Auswertesystem zur räumlichen Decodierung denkbar, das beispielsweise auf adaptivem Wege die Übertragungsfunktion  $M^{-1}$  annimmt. Hierzu sind lediglich Kenntnisse der interauralen Übertragungsfunktion notwendig. Damit ist zunächst auf einfachem Wege der systemtheoretische Nachweis möglich, daß im überlagerten Schallfeld prinzipiell zwei Schallquellen gleichzeitig diskriminierbar sind, sofern über hinreichend verschiedene elektroakustische Übertragungsfaktoren übertragen wird. Das Gehör kann theoretisch die Signalanteile trennen, die von dem Lautsprecher A und dem Lautsprecher B einer stereofonen Anordnung herrühren.

Zur genaueren Betrachtung der räumlichen Decodierung gibt Bild 2 die Strukturen der zueinander inversen Netzwerke wieder. Die Schallquellen erzeugen an den Trommelfellen die Summensignale

$$L = l_1 \cdot A + l_2 \cdot B \quad (1)$$

bzw.

$$R = r_2 \cdot B + r_1 \cdot A, \quad (2)$$

wobei  $l_{1,2}$  und  $r_{1,2}$  die ortsabhängigen elektroakustischen Übertragungsfaktoren für das linke bzw. rechte Ohr darstellen (Quelle A befindet sich am Ort 1,

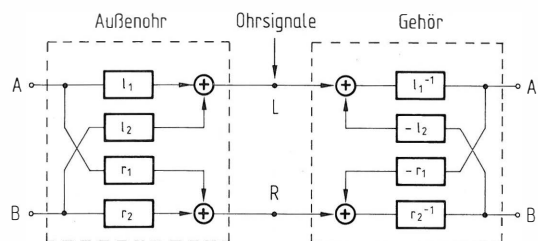


Bild 2

Räumliche Codierung und Decodierung bei zwei Schallquellen

Quelle B am Ort 2). Das Außenohr wirkt als Matrix  $M$ , die dem Signal der Quelle A bzw. B die räumliche Codierung aufprägt. Die räumliche Decodierung im Gehör geschieht nach erfolgter Mustererkennung in der angepaßten Matrix  $M^{-1}$ , deren inverse Übertragungsfunktion mit den Gleichungen

$$A' = \frac{r_2 \cdot L - l_2 \cdot R}{l_1 \cdot r_2 - r_1 \cdot l_2}, \quad (3)$$

$$B' = \frac{l_1 \cdot R - r_1 \cdot L}{l_1 \cdot r_2 - r_1 \cdot l_2} \quad (4)$$

beschrieben werden kann. Durch Einsetzen der Gleichungen (1) und (2) in (3) bzw. (4) ist die räumliche Decodierung nachgewiesen:

$$A' = \frac{r_2 \cdot l_1 \cdot A + r_2 \cdot l_2 \cdot B - l_2 \cdot r_2 \cdot B - l_2 \cdot r_1 \cdot A}{l_1 \cdot r_2 - r_1 \cdot l_2} = A, \quad (5)$$

$$B' = \frac{l_1 \cdot r_2 \cdot B + l_1 \cdot r_1 \cdot A - r_1 \cdot l_1 \cdot A - r_1 \cdot l_2 \cdot B}{l_1 \cdot r_2 - r_1 \cdot l_2} = B. \quad (6)$$

Die räumliche Decodierung kann demnach mit Hilfe eines linearen Netzwerkes erfolgen, das sich in der geschriebenen Form „an den Schallquellenort angepaßt“ verhält. Es ist an dieser Stelle ohne Belang, ob die Anpassung mit einem variablen Netzwerk oder mit variablen Bewertungsfaktoren an den Ausgängen einer Bank von Netzwerken nachgebildet wird.

Das Wesen der Lokalisation liegt offenbar in einem Erkennungsprozeß, der die Information für die optimale Anpassung liefern kann und damit erst die **Voraussetzung** schafft für eine Isolation bestimmter Signalmuster.

Das Wesen der Lokalisation soll deshalb in einem Erkennungsprozeß liegen, der zur Selektion führt. Ganz entsprechend enthält das Funktionsschema der Ortsassoziationsstufe einen Baustein „Mustererkennung“, der die Information für die optimale Filteranpassung liefert. Der Mustererkennungprozeß schafft die Voraussetzung für eine Isolation bestimmter Signalmuster.

#### 2.1.2. Die assoziative Mustererkennung

Eine wichtige Arbeitshypothese zur Entwicklung entsprechender Modelle für die Mustererkennung stellt die Annahme dar, daß bestimmte aktuelle Reize ganz bestimmte Assoziationsprozesse auslösen. Diverse adaptive Vorgänge bei der Lokalisation legen nahe, daß sich der Zusammenhang zwischen Hörereignis- und Schallereigniseigenschaft mit Assoziationsprozessen erklären läßt [8]. Das gleiche gilt für verschiedene „Lokalisationsfehler“. Wenn Assoziationsprozesse bewirken, daß Hörereignisort und Schallquellenort normalerweise deckungsgleich auftreten, so müssen entsprechende Lokalisationsabweichungen gerade mit diesen Assoziationsprozessen erklärbar sein. Tatsächlich scheint das nicht nur für das Phänomen „Phantom-schallquelle“ zuzutreffen [20]. Folgende weitere Beispiele für Divergenzen zwischen Hörereignisort und Schallquellenort entstehen unter speziellen, widernatürlichen Umständen:

1. Die Hörereignisrichtung in der Medianebene steht im direkten Zusammenhang mit dem Signalspek-

trum; sie verhält sich bei schmalbandigen Signalen von der Schalleinfallrichtung unabhängig. Die Abhängigkeit vom Spektrum läßt sich aus den linearen Verzerrungen ableiten, die vom Außenohr verursacht werden (Blauert [16]) und zur Prägung von richtungsbestimmenden Reizmustern führen.

2. Die Hörereignisentfernung steht bei Signalkennntnis im direkten Zusammenhang mit Signalpegel und -spektrum [21]. Bei Lautsprecherdarbietung im kleinen Schallfeld verhält sie sich abhängig von der Hörerfahrung [9]: Entscheidend ist das Verhältnis der Lautheit und Klangfarbe zur assoziierten Lautstärke und „Tonlage“ der Schallquelle.
3. Die Hörereignisrichtung entspricht nicht der Schalleinfallrichtung bei Fehl Anpassung an die bisherige Hörerfahrung, beispielsweise nach plötzlicher Normalisierung eines einseitig krankhaft veränderten Gehörs (Operation, [22]).
4. Der Hörereignisort läßt sich, in bestimmten Grenzen unabhängig vom Schallquellenort, durch Assoziationslenkung beeinflussen, beispielsweise durch begleitende akustische oder optische Reize (z. B. [14, 23 („räumliche Komplikation“), 24, 25, 26]).
5. Die vielfältigen Ursachen der Im-Kopf-Ortung lassen sich zusammenfassen, wenn man davon ausgeht, daß die Lokalisation über einen Reizmustervergleich zwischen aktuellem Reiz und erlernten Reizmustern erfolgt [27, 28]. Im-Kopf-Ortung tritt auf, sobald der Reiz sich nicht einem ortsbestimmenden Reizmuster zuordnen läßt; sie kann durch Assoziationslenkung verhindert werden (z. B. optische Information, [29]).

Bevor das vollständige Lokalisationsmodell entwickelt wird, soll die Bedeutung des Assoziationsprinzips auf anderen Forschungs- und Anwendungsgebieten kurz umrissen werden. Es zeigt sich dabei, daß wesentliche Bereiche des Wahrnehmungsprozesses mit einer Art „assoziativen Mustererkennung“ erklärt und auch in stark vereinfachter Form beschrieben werden können, daß andererseits jedoch Assoziationsvorgänge – beispielsweise aus neurophysiologischer Sicht – in der nervösen Verarbeitung des zentralen Nervensystems nicht einheitlich als erwiesen gelten.

Aus wahrnehmungspsychologischer und informationstheoretischer Sicht geben Assoziations- und Mustererkennungsmechanismen aber die oft einzig mögliche Erklärung bestimmter Phänomene der auditiven (und visuellen) Wahrnehmung. Dazu gehört z. B. die Erscheinung der „simultanen Hörereignisse“ bei Darbietung verschiedener Signale über einen Lautsprecher. Das entspricht nachrichtentechnisch dem Empfang getrennter Signale nach Übertragung über einen einzigen Kanal mit der Bandbreite eines Signals. Diese grundlegende Fähigkeit unseres Gehörs ist leicht nachzuweisen und nachrichtentechnisch wohl nur mit der informationsreduzierenden Wirkung von Mustererkennungsmechanismen erklärbar.

**Assoziative Mustererkennung** ist ein Prozeß, der ein aktuelles Muster mit einem gespeicherten Muster verknüpft, selbst dann, wenn nur Teile des

gespeicherten Musters im aktuellen Muster enthalten sind.

Dieser bis heute noch hypothetische Mechanismus ist seit langer Zeit auf mehreren Forschungsgebieten Gegenstand des Interesses, so besonders in der Kybernetik, vergleiche Flechtner [30]. In der Neurophysiologie wird die Existenz eines „sensorischen Assoziationssystems“ für die Verarbeitung der sensorischen Erregungen im zentralen Nervensystem vermutet (z. B. [31]); es gilt indes als nahezu unerforscht. Die hier erkennbaren Vorstellungen sind stark beeinflusst von kybernetischen Modellen. Besonders in jüngerer Zeit versucht man intensiv, die speziellen Fähigkeiten des menschlichen Gehirns nachzubilden, um sie zu untersuchen oder technisch anzuwenden. Assoziative Informationsspeicherung und assoziativer Informationsruf stellen dabei offenbar ein Grundprinzip der Verarbeitung dar [32 bis 40].

Ein „Modell eines neuralen Netzwerkes“ von Wigstroem [41] beispielsweise:

„... das für die Beschreibung der Gehirnrinde gedacht ist, besteht aus einem Netzwerk von Zellen, die von erregendem und hemmendem Typ sind. Es hat die Fähigkeit für assoziatives Lernen. Es wird gezeigt, daß unter geeigneten Bedingungen das Ausgangsmuster von nur einer Hauptkomponente gebildet wird, auch wenn das erregende Eingangsmuster aus einem Gemisch von mehreren Mustern, die beim Lernprozeß Verwendung fanden, besteht. Diese Hauptkomponente ist ein Teil des speziellen Ausgangsmusters, das beim Einlernen mit dem Eingangsmuster assoziiert wurde. Das Verhalten wird durch einen dynamischen Prozeß erreicht, in dem die Musterseparationseigenschaften der Rückkopplungskreise eine wichtige Rolle spielen. Die Funktion des Modells kann als Mustererkennung betrachtet werden.“

Als weiteres Beispiel sei die Arbeit von Willwacher [42] angegeben, der die „Fähigkeiten eines assoziativen Speichersystems im Vergleich zu Gehirnfunktionen“ untersuchte. Das vorgestellte Netzwerk vermag in stark vereinfachter Weise Leistungen des menschlichen Gehirns nachzuahmen: parallele Assoziation (vollständiger Aufruf eines Musters durch Eingabe eines Teils des Musters), serielle Assoziationen (Aufruf einer zeitlichen Mustersequenz durch Eingabe eines Anfangsmusters), Zuordnung eines unbekannten (nicht gespeicherten) Musters, Zuordnung von Mustern aus zwei Systembereichen, Assoziation einer wahrscheinlichen Musterfolge, Störung des Assoziationsvorgangs, „Eselsbrücke“, „Abstraktion des Gemeinsamen“, „Umlernen“, „produktiver Einfall“.

Diesen und anderen kybernetischen Ansätzen ist gemeinsam, daß die verwendeten Systembausteine ein den realen Neuronen analoges Verhalten zeigen. Da bis heute keine bis ins einzelne gehenden Befunde der Neurologie über die Struktur des Gehirns und die Art der Mustererkennung vorliegen, synthetisiert man mit Hilfe der bekannten Bausteine entsprechende Gehirnleistungen, um daraus Hypothesen zur Gehirnfunktion zu gewinnen. Die zentrale Hypothese lautet, daß Assoziationsvorgänge ein Grundprinzip der sensorischen Reizverarbeitung darstellen.

### 2.1.3. Ein Funktionsschema der Ortsassoziationsstufe

Die Ortsassoziationsstufe leistet die Lokalisationsreizselektion. Der Verarbeitungsprozeß dieser Stufe läßt sich beispielsweise mit der Wirkung eines ortsabhängigen Filters beschreiben, dessen Parameter

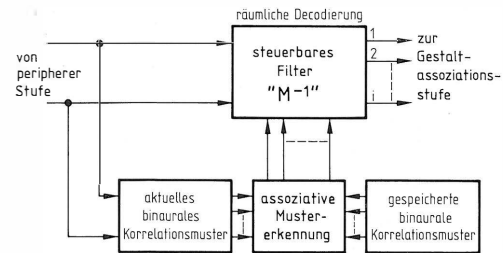


Bild 3

### Funktionsschema der Ortsassoziationsstufe

Das adaptive Filter „M-1“ erzielt die räumliche Decodierung entsprechend Bild 1, sobald die assoziative Mustererkennung erfolgt

aufgrund der assoziativen Mustererkennung gesteuert werden. Als zweckdienliches Signalmuster für den Erkennungsprozeß wird ein in [8] definiertes „binaurales Korrelationsmuster“ gewählt. Das Funktionsschema gibt Bild 3 wieder.

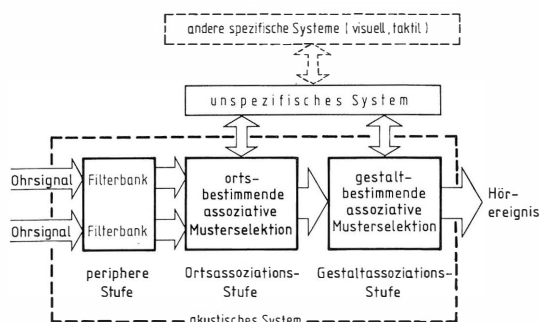
Es sei angenommen, daß die Verknüpfung zwischen Ein- und Ausgangssignal das Verhalten dieser hypothetischen Verarbeitungsstufe beschreibe. Das Schema soll nicht die innere Struktur der sensorischen Verarbeitung nachbilden. Die Funktion der Stufe setzt voraus, daß der Erfahrungsprozeß stattgefunden hat, daß also das gespeicherte binaurale Korrelationsmuster vorliegt.

Kennzeichnend ist die selektive Eigenschaft. Das von der peripheren Stufe ankommende Signal enthält eine Rauminformation und eine Gestaltinformation (einer Schallquelle). Die Rauminformation wird mit Hilfe des Mustererkennungsprozesses erkannt, die Gestaltinformation mit Hilfe des adaptiven Filters „M-1“ diskriminiert und der Gestaltassoziationsstufe zugeführt. Mit anderen Worten: Das ankommende Signal wird mit Hilfe des ortsangepaßten Filters „M-1“ von der Beeinflussung durch das Außenohr entsprechend dem Schallquellenort befreit, die Bewertung des Sendesignals durch die wirksame Übertragungsfunktion wird aufgehoben, das reine Sendesignal sowie die gewonnene Richtungs- und Entfernungsinformation werden **getrennt** weitergeleitet.

### 2.2. Die Wirkungsweise des Assoziationsmodells

Die vorangegangenen Überlegungen führen auf das in Bild 4 gezeigte Funktionsprinzip des Assoziationsmodells. Es umfaßt neben der peripheren Stufe, in der die Ohrsignale zunächst mit Hilfe von Filterbänken im Bereich etwa konstanter relativer Bandbreite spektral zerlegt werden (vergleiche [15, 43, 44, 45]), die beiden zentralen Verarbeitungsstufen Ortsassoziationsstufe und Gestaltassoziationsstufe. Jeder der beiden Verarbeitungsprozesse geschieht auf dem Wege einer assoziativ gesteuerten Musterselektion: Bestimmte Ohrsignale lösen nach der peripheren Verarbeitung in der ersten zentralen Stufe eine Ortsassoziation und in der höhergelagerten Stufe eine Gestaltassoziation aus.

Beide zentralen Auswertungsstufen enthalten die im Prinzip gleichen Verarbeitungsmechanismen. Ebenso wie der für die Ortsassoziationsstufe bereits beschriebene Mechanismus zur Lokalisationsreizselektion enthält die Gestaltassoziationsstufe einen Mechanismus zur Selektion der Gestalt.



**Bild 4**  
Das Funktionsprinzip des Assoziationsmodells

Geht man davon aus, daß beide Assoziationsprozesse nur aufgrund verschiedener gespeicherter Merkmalsmuster unterschiedlich wirken, so kann von den Fähigkeiten der Gestaltassoziationsstufe in bestimmten Grenzen [8] auf die Fähigkeiten der Ortsassoziationsstufe geschlossen werden: Die Fähigkeit der Gestaltassoziationsstufe beispielsweise, zwei (oder mehr) Schallereignisse auch bei identischer räumlicher Eigenschaft gleichzeitig diskriminieren zu können, entspricht der hypothetischen Fähigkeit der Ortsassoziationsstufe, zwei (oder mehr) Schallereignisse bei identischer Gestalteigenschaft gleichzeitig diskriminieren zu können.

Die Grenzen der Lokalisationsreizselektion sind aus informationstheoretischer Sicht erreicht, wenn die Informationsreduktion, die bei der assoziativen Signalverarbeitung erreicht wird, optimal genutzt wird. Sie sind in [8] in Hinblick auf die gleichzeitige Diskriminierbarkeit von **zwei** bestimmten Schallereignissen beliebiger räumlicher Konstellation näher untersucht worden.

Es wird angenommen, daß die Funktion des akustischen Assoziationsystems von einem sogenannten „unspezifischen System“ im Sinne einer Assoziationslenkung beeinflusst wird. (In der Neurophysiologie weiß man, daß dieses „Retikulärsystem“ mit allen Bereichen des Großhirns in Verbindung steht und man vermutet, daß es eine Koordination der Erregungsverarbeitung, beispielsweise der Verarbeitung akustischer und optischer Erregungen, sowie eine bewußtseins- und aufmerksamkeitsabhängige Erregungsauswahl bewirkt; vergleiche Caspers [31].) Beide Verarbeitungsstufen des akustischen Systems sind Bestandteil des Kurzzeitgedächtnisses und des Langzeitgedächtnisses; sie wirken im Sinne der für den Wahrnehmungsvorgang notwendigen Informationsreduktion.

Die Eigenschaft der Ortsassoziationsstufe ergibt sich aus der bereits beschriebenen Lokalisationsreizselektion, die sich als Wirkung eines adaptiven Filters auffassen läßt, das die räumliche Decodierung entsprechend den Gleichungen (5) und (6) vornimmt, sofern der entsprechende Mustererkennungsprozeß die für die Steuerung des Filters notwendige Information liefern kann.

Die Gestaltassoziationsstufe hat die Eigenschaft, einen empfangenen Reiz unabhängig von seiner räumlichen Information zu verarbeiten. Diese Stufe repräsentiert alle Mechanismen, die für eine inhalt-

liche Wahrnehmung des Reizes erforderlich sind und deren Teilbereiche für eine Vielzahl unterschiedlicher Hörphänomene verantwortlich sind. Hierzu gehören Mechanismen der Signalverschmelzung sowie der Erkennung und Bewertung von Musik und Sprache.

Von Bedeutung für das räumliche Hören sind im Assoziationsmodell die Gesetzmäßigkeiten der binauralen Signalerkennung (BMLD und BILD, siehe Blauert [15]), die der Gestaltassoziationsstufe zugeschrieben werden. Entsprechende Modelle, z. B. das „Akkumulationsmodell“ von Schenkel [46], das „EC-Modell“ von Durlach [47] oder das „Korrelationsmodell“ von Osman [48], sind also der Lokalisationsreizselektion nachgeschaltet.

Das Modell zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen von Terhardt [49] läßt sich besonders gut mit der assoziativen Verarbeitung der Gestaltassoziationsstufe vereinbaren. Es basiert ebenfalls auf Verarbeitungsprozessen, die sich aus der angelernten Kenntnis der Tonhöhenbeziehungen ergeben. Auch die Tonhöhen von Klängen werden hier als Hörereignis-Eigenschaft aufgefaßt, die – unter bestimmten Voraussetzungen – infolge der Hörerfahrung wahrgenommen wird. Im Sinne des Assoziationsmodells geschieht dies, nachdem durch die Wirkung der Ortsassoziationsstufe die spektralen Informationen, die aufgrund der Übertragungsfunktion des Außenohres auftreten, eliminiert werden.

Das Assoziationsmodell sagt voraus, daß die Tonhöhenwahrnehmung von Klängen ebenso wie die Wahrnehmung der Klangfarbe unabhängig ist vom Schallquellenort. Diese Erkenntnis entspricht der Erfahrung, wurde aber noch nicht experimentell belegt. Sie ergibt sich aus der Wirkung der Ortsassoziationsstufe: Wegen der Lokalisationsreizselektion gelangt allein das diskriminierte Sendesignal an die Gestaltassoziationsstufe; erst hier erfolgen die Prozesse, die zur Tonhöhen- und Klangfarbenwahrnehmung führen.

### 3. Diskussion und Konsequenzen des Modells

#### 3.1. Summenlokalisierung

Ein wichtiger Spezialfall der Lokalisation im überlagerten Schallfeld liegt bei Stereophonie über Lautsprecher vor. Kennzeichnendes Merkmal dieser Technik ist offenbar die Tatsache, daß Hörereignisort und Schallquellenorte nicht übereinstimmen. Man spricht dann pauschal von einer „Phantomschallquelle“, weil ein Hörereignis dort wahrgenommen wird, wo sich keine Schallquelle befindet.

Im Sinne der vorangestellten Definition kann aber das Wort „Schallquelle“ nicht zur Beschreibung des Hörereignisraumes herangezogen werden. Die Phantomschallquelle wird deshalb in der Literatur auch im Sinne einer „gedachten Schallquelle“ verstanden, mit deren Hilfe man die physikalische Seite der Lokalisation zu beschreiben sucht. Man geht davon aus, daß die Phantomschallquelle grundsätzlich eine Ersatzschallquelle darstellt, in deren Schallfeld am Hörort die gleichen Ohrsignalmerkmale erzeugt werden wie im überlagerten Schallfeld.

Alle bekannten Phantomschallquellentheorien basieren gemeinsam auf der grundsätzlichen Annahme, daß „Summenlokalisierung“ [50] stattfindet. Darunter



wird die Vorstellung verstanden, daß aus den Schallfeldüberlagerungen an den Ohren Summensignale resultieren, deren Komponenten das Gehör nicht mehr trennen kann. Man vermutet deshalb bei der Lokalisation einer „Phantomschallquelle“ und bei der Lokalisation einer entsprechenden, am Ort der Phantomschallquelle befindlichen Realschallquelle eine Äquivalenz der Ohrsignalmerkmale am linken Ohr bzw. am rechten Ohr. In den Arbeiten über Summenlokalisation werden verschiedene Äquivalenztheorien beschrieben, deren Gültigkeitsbereiche sich jedoch auf das Richtungshören beschränken, oft sogar speziell auf das Richtungshören in der Horizontalebene [7, 51, 52, 53, 54].

Gegen das hypothetische Prinzip der Summenlokalisation wurde erst in jüngster Zeit ein „spektraler Einwand“ formuliert [8, 20]. Er besagt, daß die spektralen Eigenschaften die Ohrsignale, die aus der Schallfeldüberlagerung resultieren, sich nicht mit den Eigenschaften des zugeordneten Hörereignisses vereinbaren lassen. Weder die Entfernung, noch die Elevation, noch die Klangfarbe des Hörereignisses „Phantomschallquelle“ lassen sich den resultierenden Summensignalen an den Ohren unter der Annahme zuordnen, daß diese Ohrsignale einen einzigen Lokalisationsreiz darstellen. Vielmehr sind diese Eigenschaften des Hörereignisses „Phantomschallquelle“ von den Lokalisationsreizen bestimmt, die die Lautsprecher signale getrennt hervorrufen. Einzelheiten dazu sind in [8] ausführlich beschrieben.

Die Phantomschallquelle läßt sich hinsichtlich der an den beiden Ohren wirksamen Spektren nicht als Ersatzschallquelle auffassen. Diese Erkenntnis steht im Widerspruch zu den Summenlokalisationstheorien, wird dagegen vom Assoziationsmodell vorhergesagt: Infolge der Lokalisationsreizselektion werden die Lautsprecher signale aufgrund der unterschiedlichen Lautsprecherorte zunächst diskriminiert (Wirkung der Ortsassoziationsstufe). Erst nach erfolgter räumlicher Decodierung verschmelzen die Reize, weil die Lautsprecher hinreichend ähnliche Signale abstrahlen (Wirkung der Gestaltassoziationsstufe). Detaillierte Angaben findet man in [5, 8, 20].

Besonders in der Phantomschallquellsituation wird deutlich, daß der Hörereignisort (Richtung, Entfernung und Elevation) nicht einem Verarbeitungsprozeß zugeschrieben werden kann, welcher der Lokalisation einer entsprechenden Ersatzschallquelle gleichkommt. Das Assoziationsmodell befindet sich mit diesem Sachverhalt in Übereinstimmung, weil nicht grundsätzlich der eigentliche ortsbestimmende Verarbeitungsprozeß den Hörereignisort festlegt. Vielmehr führen im Modell die Ortsassoziationen nur in Verbindung mit zugeordneten Gestaltassoziationen zu Hörereignissen; es gibt keinen Hörereignisort ohne zugeordnete Hörereignisgestalt.

### 3.2. Ersatzschallquelle oder Phantomschallquelle?

Unterschiedliche Verarbeitungsprozesse im Gehör können also im Prinzip identische Hörereignisorte hervorbringen. Dies geschieht abhängig von den Ohrsignalen immer dann, wenn unterschiedliche Orts- und Gestaltassoziationen in ihrer Gesamtwirkung zur gleichen Lokalisation führen. Zwei Lautsprecher in Stereostandardaufstellung beispielsweise können

mit bestimmten Signalen genau die Ohrsignale erzeugen, die eine Realschallquelle verursachen würde (z. B. Tradis-Verfahren [55]); der Hörereignisort kommt als Folge einer Ortsassoziation zustande, die fiktive Schallquelle ist eine **Ersatzschallquelle**. Zwei andere Lautsprecher signale können aber auch ein Schallfeld erzeugen, welches entsprechend der wirksamen Schallereignisorte zwei Ortsassoziationen auslöst und dennoch den gleichen Hörereignisort wie im ersten Fall verursacht; die fiktive Schallquelle ist in diesem Fall eine **Phantomschallquelle**.

Kommt die Lokalisation eines Hörereignisses im überlagerten Schallfeld als Folge einer einzigen Ortsassoziation zustande, ist die fiktive Schallquelle eine **Ersatzschallquelle**.

Kommt die Lokalisation eines Hörereignisses im überlagerten Schallfeld als Folge von wenigstens zwei Ortsassoziationen zustande, so ist das Hörereignis die Folge einer **Phantomschallquelle**.

Aus diesen Definitionen leiten sich zwei weitere ab, die für die Beurteilung stereofoner Übertragungsverfahren von Bedeutung sind:

**Kopfbezogene Stereophonie** liegt unabhängig von der Beschallungsart immer dann vor, wenn eine Ersatzschallquelle existiert.

**Raumbezogene Stereophonie** liegt unabhängig von der Beschallungsart immer dann vor, wenn eine Phantomschallquelle existiert.

Wie sich zeigen wird, ermöglichen die Definitionen eine zweckmäßige Systemübersicht für die unterschiedlichen Möglichkeiten stereofoner Übertragung. Die Definitionen sind zweckmäßig, weil sie sich unmittelbar aus der Funktion des Gehörs ableiten. Die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation im überlagerten Schallfeld wird mit dem Assoziationsmodell, keinesfalls aber mit Summenlokalisationsmodellen ausreichend einheitlich und allgemeingültig beschrieben.

Diese Aussage des Assoziationsmodells entspricht nicht dem in der Literatur zu findenden Verständnis über die Funktion des Gehörs beim räumlichen Hören. Man geht bisher davon aus, daß der überaus komplexe Prozeß, der zur Lokalisation führt, eindeutig beschreibbar sein müsse, wenn nur die räumlichen Eigenschaften des Hörereignisses eindeutig festliegen. Die Vorstellung ist unrichtig, weil unterschiedliche Ohrsignale die gleichen räumlichen Hörereigniseigenschaften hervorrufen können, sobald mehr als eine Schallquelle das Hörereignis bestimmt. Man geht weiterhin davon aus, daß der Lokalisationsprozeß grundsätzlich auf die Wirkung einer ortsbestimmenden Verarbeitungsstufe im Gehör zurückführbar sein müsse. Diese Vorstellung ist nicht zwingend und erscheint unwahrscheinlich, weil dann die ortsbestimmende Verarbeitungsstufe bestimmte Ohrsignale unterschiedlich interpretieren würde.

Demgegenüber ergeben sich die Zusammenhänge beim räumlichen Hören nach dem Assoziationsmodell wie folgt:

1. Eine Einzelschallquelle ruft in der ortsbestimmenden Stufe (unter bestimmten Bedingungen) eine Ortsassoziation hervor, welche allein den Hörereignisort festlegt.

2. Zwei Schallquellen, die hinsichtlich Ort und Sendesignal verschieden und unabhängig sind, rufen (unter bestimmten Bedingungen) in der ortsbestimmenden Stufe zwei Ortsassoziationen und in der gestaltbestimmenden Stufe zwei Gestaltassoziationen hervor. Entsprechend der Schallereignisse sind auch die Hörereignisse hinsichtlich Ort und Gestalt „entkoppelt“, so daß die Lokalisation allein auf die Wirkung der Ortsassoziationsstufe zurückzuführen ist.
3. Zwei Schallquellen, die nur hinsichtlich des Ortes verschieden und hinsichtlich des Sendesignals verkoppelt sind, rufen (unter bestimmten Bedingungen) in der ortsbestimmenden Stufe nach wie vor zwei Ortsassoziationen hervor. In der Gestaltassoziationsstufe kann aber entsprechend der Verkopplung der Sendesignale keine Entkopplung stattfinden. Da ein Hörereignis grundsätzlich von beiden Verarbeitungsstufen bestimmt ist, treten infolge der gemeinsamen Gestalteeigenschaften entsprechend verkoppelte Hörereignisse auf. Identität der Sendesignale führt deshalb zur vollständigen Hörereignisverschmelzung, also auch zur Verschmelzung der Hörereignisorte. In diesem Fall muß die Lokalisation sowohl auf die Wirkung der Orts- als auch der Gestaltassoziationsstufe zurückgeführt werden.

Allgemein gilt, daß die Lokalisation nur dann mit der Funktion einer ortsbestimmenden Verarbeitungsstufe erklärt werden kann, wenn allein ein Lokalisationsreiz zur Bildung des Hörereignisses beiträgt. Ein Lokalisationsreiz liegt vor, wenn hinreichend breitbandige, binaurale Ohrsignale ausschließlich durch die Wirkung von Kopf und Außenohren im Schallfeld miteinander verkoppelt sein können.

### 3.3. Gesetz der ersten Wellenfront, Cocktailparty-Effekt

Die grundsätzliche Unterscheidung einer ortsbestimmenden und einer gestaltbestimmenden Verarbeitungsstufe im Gehör führt auf ein besonderes Verständnis für Hörphänomene, die im überlagerten Schallfeld auftreten. Speziell solche Erscheinungen, die von der Beziehung der Sendesignale abhängen (Phantomschallquelle, Gesetz der ersten Wellenfront, Cocktailparty-Effekt), lassen sich im Assoziationsmodell infolge der „zweidimensionalen“ Verarbeitung prinzipiell erklären. Die Ortsassoziationsstufe diskriminiert einzelne Sendesignale aufgrund der räumlichen Informationen; erst die Reizantworten dieser Stufe unterliegen in der nachfolgenden Stufe der gestaltbestimmenden Verarbeitung, erst hier kommt also die Beziehung der Sendesignale zur Wirkung. Sofern die beteiligten Sender selektierbare und simultane Lokalisationsreize hervorrufen, können bei festen Sendeorten durch Verändern der Sendesignalbeziehungen nur die Gesetzmäßigkeiten der Gestaltassoziationsstufe untersucht werden, – und zwar auch dann, wenn die Sendesignalbeziehungen den Hörereignisort beeinflussen.

#### 3.3.1. Das Gesetz der ersten Wellenfront

Die Horizontalrichtung einer Phantomschallquelle hängt von der eingefügten Laufzeit- und/oder Pegeldifferenz der beiden breitbandigen Lautsprechersignale ab. Diese Erscheinung (Laufzeitstereofonie

ebenso wie Intensitätsstereofonie) erklärt das Assoziationsmodell mit der Lokalisationsreizselektion einerseits und mit den Gesetzmäßigkeiten der Gestaltassoziationsstufe andererseits: Der erste Lokalisationsreiz (bzw. derjenige größerer Intensität) an der Gestaltassoziationsstufe hat ein größeres Gewicht. Im Zusammenhang mit Kompatibilitätsfragen bei Kunstkopfstereofonie wird hierüber ausführlich in [5] berichtet.

Die jeweils zuerst an der Gestaltassoziationsstufe eintreffenden Reizantworten dominieren im Verarbeitungsprozeß dieser Stufe, die späteren werden gedämpft; dies um so mehr, je größer die Zeitdifferenz der eintreffenden Lokalisationsreize wird. Erst nach Überschreitung einer Zeitdifferenz von etwa 10 bis 30 ms bekommt der nacheilende Lokalisationsreiz wieder zunehmendes Gewicht, er wird oberhalb der Echschwelle (Definition z. B. in [15]) als getrenntes Hörereignis wahrnehmbar. Darüber hinaus vermittelt das Modell, daß im gesamten Zeitdifferenzbereich zwischen 0 und 10 bis 30 ms kein prinzipieller Unterschied in der Reizauswirkung besteht. Vielmehr wird angenommen, daß die Gesetzmäßigkeiten sowohl der Laufzeitstereofonie als auch der ersten Wellenfront auf eine zeitabhängige Bewertung der nacheinander eintreffenden Lokalisationsreize zurückführbar sind.

Die Ortsassoziationsstufe wirkt im überlagerten Schallfeld als Filter zur Diskrimination der Sendesignale, so daß nur in der nachgeschalteten Gestaltassoziationsstufe die Sendesignalbeziehung bewertet wird. Zwei Sendesignale mit Laufzeitunterschieden führen dazu, daß zwei Lokalisationsreize nicht zugleich eintreffen. Alle resultierenden Gesetzmäßigkeiten für die zugeordneten Hörereignisorte lassen sich als „**Gesetz des ersten Lokalisationsreizes**“ verstehen.

Darüber hinaus sagt das Modell aus, daß Laufzeitstereofonie auch für stationäre breitbandige Signale möglich ist, dagegen das Gesetz der ersten Wellenfront nur an Signalen mit ausgeprägten Hüllkurven nachzuweisen ist. Und es sagt weiter aus, daß die durch Signalverzögerungen verursachten Effekte im Prinzip auch bei Kopfhörerdarbietung auftreten müssen, sofern eine ausreichende Lokalisierbarkeit der Einzelschallquellen vorliegt. Nähere Einzelheiten dazu in [8].

#### 3.3.2. Der Cocktailparty-Effekt

Die Selektionseigenschaften sowohl der Ortsassoziationsstufe als auch der Gestaltassoziationsstufe ermöglichen es, gleichzeitig unterschiedliche Muster zu diskriminieren. Abhängig von den Orten der Sender und von den Eigenschaften der Sendesignale treten die zugeordneten Ortsassoziationen und Gestaltassoziationen auf. Wenn davon ausgegangen wird, daß jede Selektionsstufe gleichzeitig wenigstens zwei Muster diskriminieren kann, ergibt sich ein prinzipieller Ansatz, um auch den Cocktailparty-Effekt mit Hilfe des Assoziationsmodells erklären zu können.

Die Phantomschallquelle verschwindet, sobald die beiden Lautsprechersignale hinreichend unähnlich werden, das heißt sobald sie unterschiedliche Hörereignisgestalten hervorrufen. Dies ist der allgemeine, natürliche Fall eines überlagerten Schallfelds.

des. Zwei Schallquellen rufen normalerweise nicht nur zwei verschiedene Ortsassoziationen, sondern zusätzlich zwei verschiedene Gestaltassoziationen hervor. Die resultierenden beiden Hörereignisse treten dann also nach zweistufiger Selektion auf, woraus sich die größtmögliche Auflösung ableitet. Trägt nur die Gestaltassoziationsstufe zur Hörereignisauflösung bei, weil beide Lautsprecher sich am gleichen Ort befinden, so geht die Hörereignisauflösung auf einen Grenzwert zurück (Grenzauflösung der Gestaltassoziationsstufe, [8]). Man erkennt auch hier die Bedeutung der Gestaltassoziationsstufe für das räumliche Hören: Simultane Hörereignisorte können nur auftreten, wenn die auslösenden Reizmuster zusätzlich verschiedene Hörereignisgestalten hervorrufen.

Umgekehrt ergibt sich der Cocktailparty-Effekt als Wirkung der Ortsassoziationsstufe; simultane Hörereignisgestalten können unter bestimmten Bedingungen erst auftreten, wenn die auslösenden Reizmuster zusätzlich als Lokalisationsreize wirken. Beispielsweise kann aus einem ausreichend vielstimmigen Stimmengewirr nicht ein bestimmter Sprecher „herausgehört“ werden, wenn ein Ohr verschlossen wird, weil damit die Ortsassoziationsstufe keinen Selektionsbeitrag mehr liefern kann. Die Lokalisationsreizselektion ist ein sinnvoller Vorselektionsprozeß, der der höhergelagerten Mustererkennung vorangeht. Jede der beiden Verarbeitungsstufen selektiert die Muster hinsichtlich unterschiedlicher, voneinander unabhängiger Merkmale. Die resultierende Auflösung der unterschiedlichen Muster gewährleistet dann, daß das Gehör einzelne Hörereignisse unterscheiden kann. Dabei könnte die Konzentration auf ein Hörereignis dazu führen, daß infolge einer entsprechenden Assoziationslenkung die Auflösung eines bestimmten Musters weiter erhöht wird (Assoziationslenkung durch das Bewußtsein).

Die Lokalisation im überlagerten Schallfeld ist nach dieser Darstellung ein zweistufiger Prozeß, der aufgrund der Hörerfahrung die Hörereigniszuordnung leistet. Eine grundlegende Hörerfahrung lautet: Die empfangenen Ohrsignale sind zurückzuführen auf einen bestimmten Sendeort und auf ein bestimmtes Sendesignal. Beide Sendereigenschaften verhalten sich voneinander unabhängig; sie treten nur paarweise auf. Das Assoziationsmodell ist dieser Hörerfahrung vollständig angepaßt. Dies ist ein Grund für die weitreichende Aussagekraft.

### 3.4. Lokalisation oder Lateralisation?

Binaurale Ohrsignale oder Ohrsignalanteile, die keinen Lokalisationsreiz darstellen, sondern beliebig miteinander verkoppelt sind, unterliegen nicht den Gesetzmäßigkeiten einer ortsbestimmenden Verarbeitungsstufe. Dieser Sachverhalt ist besonders bei Lateralisationsexperimenten gegeben. Er läßt sich noch deutlicher darstellen, wenn die Wirkung der beiden Verarbeitungsstufen im Assoziationsmodell betrachtet wird:

Die Ortsassoziationsstufe ist der Gestaltassoziationsstufe vorgeschaltet. Damit erhält das Gehör die Eigenschaft, aus einem aktuellen Reizangebot vorzugsweise Lokalisationsreize zu selektieren. Die Lokalisationsreizselektion wirkt im überlagerten Schall-

feld als Filter zur Diskrimination einzelner Sendesignale, so daß prinzipiell erst in der Gestaltassoziationsstufe eine etwaige Verkopplung der Sendesignale zum Tragen kommt. In der Phantomschallquellsituation beispielsweise verhindert die Ortsassoziationsstufe Summenlokalisierung; die Lokalisationsreizselektion bewirkt, daß trotz der Schallfeldüberlagerung in der Gestaltassoziationsstufe die gleichen Signale verarbeitet werden wie bei Kopfhörerbeschallung.

Lateralisationsexperimente geben lediglich Auskunft über die Funktion der Gestaltassoziationsstufe, weil die beiden Sendesignale unabhängig von der Senderentfernung einzeln diskriminiert und der Gestaltassoziationsstufe zugeführt werden. Lateralisationsexperimente lassen deshalb grundsätzlich keine Rückschlüsse zu auf die Funktion der Ortsassoziationsstufe; sie führen nur auf Gesetzmäßigkeiten der Phantomschallquelle („Phantomschallquelle im Kopf“). Eine „Ersatzschallquelle im Kopf“ ist nicht vorhanden (bei adaptiertem Gehör, vgl. Plenge [28]).

Die Relevanz von Lateralisationsexperimenten für das räumliche Hören ist bisher unbekannt. Man nimmt an, daß der Lokalisationsprozeß in Teilaspekten zerlegbar ist, welche sich mit Hilfe von Kopfhörern isoliert untersuchen lassen. Stellvertretend für das in der Literatur zu findende Verständnis hierzu sei Blauert [15] zitiert:

„Die Entstehung von Hörereignissen in seitlichen Richtungen setzt unterschiedliche Ohrsignale voraus. Ohrsignalunterschiede spezifischer Art entstehen infolge Beugung, Abschattung und Resonanzen an Kopf und Außenohren. Durch Lateralisationsversuche mit Kopfhörern kann man diese sehr differenzierten Signalunterschiede auf ihre „wirksamen“ Bestandteile untersuchen.“

Speziell im Zusammenhang zur Summenlokalisierung heißt es:

„Es liegt nahe, den Einfluß der einzelnen Signalanteile auf die Hörereignisrichtung näher zu untersuchen. Dies kann z. B. so geschehen, daß man synthetisch erzeugte Impulsgruppen über Kopfhörer darbietet. Die einzelnen Signalanteile sind dann beliebig variierbar.“

Man geht davon aus, daß die „Auswertung unterschiedlicher Ohrsignale“ (Kapitel 2.4 in [15]), die das Gehör bei der Lokalisation einer Schallquelle vornimmt, sich mit zwei hinreichend nahe an den Ohren befindlichen Schallquellen untersuchen läßt. Man beachtet zwar die resultierende Im- oder Am-Kopf-Ortung formal, indem das Experiment als Lateralisationsexperiment, also als „Experiment mit mangelhafter Entfernungswahrnehmung“ ausgewiesen wird. Es gibt jedoch keinen Nachweis für die in der Literatur bisher gültige Annahme, daß die Ergebnisse aus Lateralisationsexperimenten – und die daraus abgeleiteten Hypothesen bezüglich der Vorgänge bei der Bildung von Hörereignissen in seitlichen Richtungen – sich „auch auf das räumliche Hören im freien Schallfeld verallgemeinern lassen“ [15].

### 3.5. Die Im-Kopf-Ortung

Für die stereofone Wiedergabe über Kopfhörer hat das Phänomen der Im-Kopf-Ortung eine überragende Bedeutung. Bezüglich des Hörereignisortes hat bereits Plenge [9] ein Modell beschrieben, das vermutlich eine umfassende Erklärung der Im-Kopf-Ortung zuläßt. Es enthält einen Kurzzeit- und Langzeitspeicher und einen Reizverarbeitungsmechanis-

mus, welcher gespeicherte Reizmuster mit aktuellen Reizmustern vergleicht. Die Reizverarbeitung führt dann nicht zur Lokalisation (außerhalb des Kopfes), wenn entweder der Kurzzeitspeicher keine oder (noch) falsche Information über Schallquelle und Darbietungsort enthält, oder wenn die Reize so geartet sind, daß „sie keinem im Langzeitspeicher enthaltenen Reizmuster zugeordnet werden können“. Bemerkenswert daran ist, daß die Lokalisation auf einen Lernprozeß zurückgeführt wird und dabei sowohl dem Kurzzeitgedächtnis als auch dem Langzeitgedächtnis eine spezielle Bedeutung zukommt.

Der Ansatz „Reizverarbeitung durch Vergleich mit gespeicherten Reizmustern“ [9] ist im Assoziationsmodell enthalten, die beschriebene „assoziativ gesteuerte Mustererkennung“ der Ortsassoziationsstufe stellt dessen Weiterentwicklung dar. Die Vorhersagen bezüglich des Hörereignisortes stimmen deshalb überein. Bezüglich der Hörereignisklangfarbe dagegen führt das Assoziationsmodell zu weiteren Konsequenzen, weil zusätzlich die ortsbestimmende Verarbeitungstufe die diskriminierten Sendesignale an eine gestaltbestimmende Stufe weiterleitet. Hieraus erklärt sich vor allem die Unabhängigkeit der Hörereignisklangfarbe von der Richtung **und der Entfernung** der Lautsprecher.

Diese Aussage gilt auch für die Entfernung Null, das heißt also für Kopfhörerbeschallung. Dazu sind folgende Bemerkungen zu machen:

- Die Schall- oder Hörereignisentfernung Null liegt am Kopf. Im Gegensatz zu Laws [21] u. a., die die Entfernung vom Kopfmittelpunkt (Koordinatenursprung) aus messen, kann im Sinne des Assoziationsmodells die Entfernung Null nur an den Begrenzungsflächen des Empfängers vorliegen. Ein Schallereignis im Kopf gibt es nicht. Ein Hörereignis im Kopf kann deshalb auch nicht aufgrund eines Lokalisationsprozesses auftreten; es widerspricht der Hörerfahrung. Ein „Hörereignis ohne Entfernung“ kennzeichnet die Im-Kopf-Ortung.
- Die Hörereignisklangfarbe verhält sich natürlich nur insoweit ortsunabhängig, wie dies vom Leistungsdichtespektrum des Schalldrucks am Hörort gewährleistet ist. Insbesondere sind für den Übergang der Lautsprecherentfernung gegen Null die Schalldruckverhältnisse im Nahfeld zu berücksichtigen („Nahfeldentzerrung“). Allerdings ist bisher nicht untersucht worden, ob und unter welchen Bedingungen dieser Einfluß vom Gehör ebenfalls erlernt und demzufolge decodiert wird.
- Die Decodierung der Entfernung der Lautsprecher (bzw. Kopfhörerkapseln) geschieht nur unter zwei Voraussetzungen:
  1. Die Lokalisationsbedingung „breitbandiges Spektrum“ muß eingehalten werden (vgl. 3.6.).
  2. Eine Ersatzschallquelle darf nicht existieren (keine kopfbezogenen Signale bzw. keine Kopfhörer mit „lautsprecher-simulierender Entfernung“ [21, 57, 58].

Die „mangelhafte Entfernungswahrnehmung“ bei Kopfhörerwiedergabe erklärt das Assoziationsmodell mit der „Lautsprecherwiedergabe Null“; auch die

Schallquellenorte „an den Ohren“ verursachen im Prinzip zwei Lokalisationsreize, die entsprechende Ortsassoziationen auslösen. Hieraus ergeben sich Folgerungen für die Kopfhörerentzerrung (vgl. 4.). Weiterhin ergeben sich Folgerungen für Untersuchungen der Gehörfunktionen bei der Lokalisation: Die Auswertung unterschiedlicher Ohrsignale, die das Gehör bei der Lokalisation einer Schallquelle vornimmt, kann grundsätzlich **nicht** im Lateralisationsexperiment, sondern nur unter Lokalisationsbedingungen untersucht werden [8].

### 3.6. Schmalbandige Signale

Eng verbunden mit dem Effekt „mangelnde Entfernungswahrnehmung“ ergibt sich eine weitere wichtige Konsequenz: Die geforderte Lokalisationsbedingung wird nicht eingehalten, wenn das Schallereignis ein schmalbandiges Spektrum aufweist. Denn der Wahrnehmungsprozeß, der zur Lokalisation führt, ist nur möglich, wenn spektrale Merkmale die Zuordnung der Hörereignisentfernung zulassen.

Eine Unterschreitung der minimalen Signalbandbreite hat beispielsweise in der Phantomschallquellsituation zur Folge, daß keine Lokalisationsreizelektion stattfindet. In diesem Fall trifft die Bezeichnung „Summenlokalisierung“ den Sachverhalt. Die interauralen Summensignale sind hinsichtlich ihrer „Summanden“ nicht mehr zerlegbar (vgl. „binaurales Korrelationsmuster“ in [8]). Die resultierenden interauralen Phasen- und Intensitätsbeziehungen verursachen wie bei der Lateralisation lediglich seitliche Auslenkungen. Diese allerdings können durch entsprechende Voreingenommenheit von der Versuchsperson leicht als Richtung des Hörereignisses interpretiert werden, z. B. infolge optischer Eindrücke [9, 29].

Ein weiteres Beispiel stellt der Franssen-Effekt dar [59]. Der Lautsprecher A wird mit einem Ton von einigen Sekunden Dauer angesteuert, der mit exponentieller Hüllkurve an- und abklingt [Signal  $u_A(t)$ ]. Lautsprecher B erhält ein Signal  $u_B(t)$ , das so beschaffen ist, daß die Summe  $u_A(t) + u_B(t)$  einen Ton mit rechteckiger Hüllkurve ergeben würde. Lautsprecher B gibt also den (breitbandigen) Einschaltvorgang wieder, dagegen Lautsprecher A den von Schaltvorgängen befreiten (schmalbandigen) Ton. Es zeigt sich, daß der Hörereignisort ausschließlich vom Einschaltvorgang bestimmt ist. Das stimmt mit dem Assoziationsmodell überein, wenn man annimmt, daß der Ton keinen Lokalisationsreiz darstellt, sondern wegen fehlender Entfernungsinformation dem vorhandenen Lokalisationsreiz zugeordnet wird. Entsprechend hat Wendt [60] festgestellt, daß hartgeschaltete Töne sich bei Stereophonie ebenso verhalten wie breitbandige Signale. Sie stehen mit den Hörereignisorten, die er für Dauertöne und Tonimpulse ermittelt hat, in keinem erkennbaren Zusammenhang.

Äquivalent dazu sind auch neuere Untersuchungsergebnisse von Blauert/Cobben [45] zu interpretieren, die die Hörereignisrichtung für schmalbandgefilterte und breitbandige Impulse in Abhängigkeit der Laufzeitdifferenz entsprechend **Bild 5** gemessen haben. Die Lokalisationskurven der Schmalbandsignale decken sich weder im Bereich der Laufzeit-

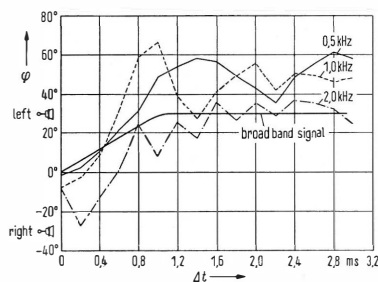


Bild 5

Hörereignisrichtung  $\varphi$  als Funktion der Verzögerung  $\Delta t$  des rechten Lautsprechersignals  
(entnommen aus [45])

stereofonie noch bei größeren Laufzeitdifferenzen mit der Kurve, die für das breitbandige Signal gemessen wurde. Man erkennt an der Periodizität dieser Kurven, daß im ganzen Verzögerungsbereich Summenlokalisierung stattgefunden hat, daß also die resultierenden interauralen Signaldifferenzen die Hörereignisrichtung bestimmt haben. Auch das Gesetz der ersten Wellenfront läßt sich in Übereinstimmung mit dem Assoziationsmodell mit Schmalbandsignalen nicht untersuchen.

Hörversuche, bei denen die Lokalisationsbedingungen nicht eingehalten werden, lassen grundsätzlich keine Rückschlüsse zu auf die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation einer Einzelschallquelle.

#### 4. Konsequenzen für die elektroakustische Übertragung

Die Wirkung der Ortsassoziationsstufe im Modell kann mit einem adaptiven Filter beschrieben werden, dessen Übertragungsfunktion  $M^{-1}$  sich invers verhält zur ortsabhängigen Übertragungsfunktion  $M$  des Außenohres (vgl. Bild 1). Dieser Sachverhalt ermöglicht die Darstellung der gesamten „psychoakustischen Funktionskette“ für den Fall einer elektroakustischen Übertragung. Kennzeichnend ist, daß die Funktion des Gehörs bei der Lokalisation im Sinne der vorangegangenen Darlegungen einen Bestandteil der Übertragungsstrecke darstellt. Anhand dieser Darstellungsform können dann psychoakustische Zusammenhänge unter den unterschiedlichen Übertragungsverfahren leicht erkannt und beschrieben werden.

Bild 6 gibt die Funktionskette wieder. Eingetragen sind die Bezeichnungen der Übertragungsfunktionen sowie der dazugehörigen Ein- und Ausgangssignale. Es bedeuten

- $q$  = Schallereigniseigenschaft,
- $q'$  = Hörereigniseigenschaft,
- $a$  = Signal am Ausgang des Aufnahmehörmikrofons,
- $b$  = zu übertragendes Signal,
- $c$  = vom Lautsprecher bzw. Kopfhörer abgestrahltes Signal,
- $e$  = nach der räumlichen Decodierung diskriminiertes Signal;
- $A$  = ortsabhängige Übertragungsfunktion des Mikrofons,

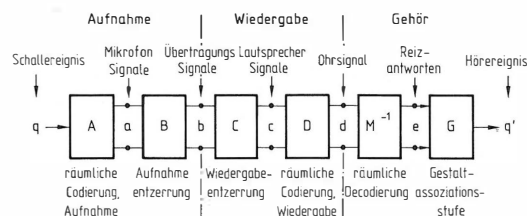


Bild 6

Schema der „psychoakustischen Funktionskette“

$B$  = Übertragungsfunktion der Mikrofon-entzerrung,

$C$  = Übertragungsfunktion der Lautsprecher- bzw. Kopfhörerentzerrung,

$D$  = ortsabhängige Übertragungsfunktion des Außenohres,

$M^{-1}$  = Übertragungsfunktion des adaptiven Filters zur räumlichen Decodierung,

$G$  = Wirkung der Gestaltassoziationsstufe.

Die allgemeine Übertragungsgleichung lautet

$$q' = A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot M^{-1} \cdot G \cdot q$$

Für das natürliche Hören gilt beispielsweise:

– Die elektroakustischen Übertragungsglieder fallen fort:  $A = B = C = 1$

– Selektierbare Lokalisationsreize erzeugt  $D$  (natürliches Hören!):  $D \cdot M^{-1} = 1$

– Ergebnis:  $q' = G \cdot q$

Die Beziehung  $q' = G \cdot q$  soll ausdrücken, daß keine Fehler beim räumlichen Hören auftreten. Schallereignisort und Hörereignisort sind identisch, jedoch ergibt sich die Hörereignisgestalt über die in diesem Lokalisationsmodell nicht definierte Abbildungseigenschaft  $G$  der Gestaltassoziationsstufe.

Die Übertragungsgleichung  $q' = G \cdot q$  ergibt sich erwartungsgemäß ebenfalls bei **kopfbezogener Stereophonie**:

– Die systemgerechte Entzerrung ist vorhanden, wenn für Aufnahme- und Wiedergabeseite eine identische Definition eingehalten wird:  $B \cdot C = 1$

– Für Kopfhörerwiedergabe ist die ortsabhängige Übertragungsfunktion des Außenohres eliminiert:  $D = 1$

– Aus  $B \cdot C \cdot D = 1$  folgt für die Ohrsignale  $d = A_K \cdot q = a$ .  $A_K$  erzeugt einen selektierbaren Lokalisationsreiz (Kunstkopfhör!):  $A_K \cdot M^{-1} = 1$

– Ergebnis:  $q' = G \cdot q$

Benutzt man anstelle des Kopfhörers Lautsprecher, die über das Tradis-Filter [55] zur Simulation der Kopfhörerwiedergabe gespeist werden, so gilt theoretisch  $C \cdot D = 1$ . Um ebenfalls  $B \cdot C \cdot D = 1$  zu erreichen, muß  $B = 1$  werden, d. h. das Tradis-Filter  $C$  muß genau abgestimmt sein auf die Entzerrung des Kunstkopfsignals.

Diese Betrachtungen lassen sich fortsetzen. Doch hier sollen mit ihrer Hilfe vor allem die Kompatibilitätsaspekte aufgezeigt werden.



Zunächst gilt für **raumbezogene Stereophonie** über Lautsprecher:

- Die Entzerrungen von Stereomikrofon und Lautsprecher sind in erster Näherung gleich (ebener Frequenzgang für Bezugsrichtung  $0^\circ$ ):  $B \cdot C = 1$
- Die selektierbaren Lokalisationsreize erzeugt D (Phantomschallquellensituation):  $D \cdot M^{-1} = 1$
- Ergebnis (Index r : übliches Stereomikrofon):  $q' = A_r \cdot G \cdot q$

Die gesamte Übertragungsstrecke läßt sich also beschreiben mit der Wirkung der Signale eines Stereomikrofons auf die Gestaltassoziationsstufe. Diese Wirkung ist in 3.3. beschrieben worden (Hörereignis-auslenkung zwischen den Lautsprechern infolge der Intensitäts- oder Laufzeitunterschiede); sie verursacht den erwünschten Stereophonie-Effekt.

Hinsichtlich der Kompatibilität raum/kopfbezogener Signale findet man folgende Aussagen:

1. Tritt an die Stelle des Stereomikrofons der Kunstkopf, so verhindert D die kopfbezogene Stereophonie: es bleibt  $D \cdot M^{-1} = 1$ ;  $A_K \cdot M^{-1} \neq 1$ ! Nur für den Fall  $C \cdot D = 1$  (Einsatz des Tradis-Filters für C) wird  $A_K \cdot M^{-1} = 1$ .
2. Die Übertragungsgleichung  $q' = A \cdot G \cdot q$  bleibt erhalten. Jedoch wirkt  $A_K$  anstelle von  $A_r$  auf G. In [5] wurde die Verknüpfung  $q' = A_K \cdot G \cdot q$  ausführlich in Hinblick auf den Hörereignisort untersucht und gezeigt, daß dieser sich aus der Summe der Wirkung von Laufzeit- und Pegeldifferenz ergibt. Wie in [5] gezeigt, ist die „gemischte Stereophonie“ kompatibel zur Intensitätsstereophonie.

#### 4.1. Die optimale Kunstkopfentzerrung

Weiterhin wurde in [6] die Übertragungsgleichung  $q' = A_K \cdot G \cdot q$  in Hinblick auf die Klangfarbe untersucht. Es wird davon ausgegangen, daß durch den Fusionsprozeß in der Gestaltassoziationsstufe die Klangfarbe unbeeinflusst bleibt von den gegebenen Zeitdifferenzen der Kunstkopfsignale. Vielmehr wird angenommen, daß das klangfarbenbestimmende Gesamtspektrum sich aus den jeweils dominierenden Anteilen zusammensetzt. Damit gestaltet sich das Klangfarbenproblem sehr übersichtlich: Die Gleichung  $q' = A_K \cdot G \cdot q$  besagt, daß die ortsabhängige Übertragungsfunktion  $A_K$  die Klangfarbenbestimmung durch G direkt beeinflusst. Komplexe, klangfarbenbeeinflussende „Verrechnungen“ dieser Spektren für die Lokalisation gibt es nicht.

Für die Bestimmung der optimalen Entzerrung werden die Funktionen B und C eingesetzt: Man kann jetzt nicht davon ausgehen, daß  $B \cdot C = 1$  ist. Es gilt:

$$q' = A_K \cdot B_X \cdot C \cdot G \cdot q$$

In dieser Gleichung ist  $B_X$  die gesuchte Entzerrung des Kunstkopfes, C die Entzerrung der Lautsprecher. Geht man davon aus, daß die Lautsprecherentzerrung gegeben ist mit  $C = C_{FF}$  (Freifeldentzerrung), dann ist ein  $B_X$  zu suchen, das sich invers verhält zu  $A_K$ . Die Forderung lautet:

$$A_K \cdot B_X = 1$$

$A_K$  ist die **ortsabhängige** Übertragungsfunktion des Kunstkopfes,  $B_X$  dagegen die **ortsunabhängige** Übertragungsfunktion des Entzerrers.

Realisiert man eine Freifeldentzerrung der Kunstkopfsignale nach [61] (Bezugsrichtung  $0^\circ$  vorne), so gilt

$$A_{K \text{ vorne}} \cdot B_X = 1$$

Diese Forderung ist zwar exakt erfüllbar, doch eine Kunstkopfentzerrung der Form  $A_{K \text{ vorne}}^{-1}$  berücksichtigt nicht die Ortsabhängigkeit von  $A_K$ . Gerade der Bezug „vorne“ ergibt in Hinblick auf die Gesamtheit aller Übertragungsfunktionen eine sehr ungünstige Entzerrung (8-kHz-Senke, vgl. [6]).

Man erkennt, daß für die Bestimmung von  $B_X$  nicht eine einzige Bezugsrichtung zugrunde gelegt werden kann, sondern vielmehr für die Gesamtheit der Schalleinfallrichtungen ein Optimum ermittelt werden muß. Geeignet ist beispielsweise die rechnerische Methode der Integralbildung über einen Katalog von Außenohrübertragungsfunktionen [62]. Noch günstiger ist der meßtechnische Weg dieser Integralbildung, nämlich die Bestimmung der Entzerrung, die einen ebenen Verlauf des Diffusfeld-Übertragungsmaßes gewährleistet. Die praktischen Aspekte für die Wahl und Realisierung dieser Diffusfeldentzerrung werden in [6] behandelt.

#### 4.2. Die optimale Kopfhörerentzerrung

Wie schon gezeigt, ist die systemgerechte Entzerrung bei kopfbezogener Stereophonie vorhanden, wenn gilt:  $B \cdot C = 1$ . Nur dann gilt die zugehörige Übertragungsgleichung  $q' = G \cdot q$ . Da sich aus der Kompatibilitätsforderung ein diffusfeldentzerrter Kunstkopf ergibt (Übertragungsfunktion  $B_{DF}$ ), muß für die Wiedergabe kopfbezogener Signale ein Kopfhörer mit Diffusfeldentzerrung  $C_{DF}$  benutzt werden.

Welche Kopfhörerentzerrung ist optimal für die Wiedergabe raumbezogener Signale? Die Lösung findet sich bei Betrachtung der Übertragungskette sehr einfach, indem die beiden Fälle „natürliches Hören“ und „Kopfhörerwiedergabe raumbezogener Signale“ gegenübergestellt werden (es sei  $A = B = C = 1$ ):

$$\text{Natürliches Hören: } q'_N = D_N \cdot M^{-1} \cdot G \cdot q$$

$$\text{Kopfhörerwiedergabe: } q'_K = C_X \cdot D_K \cdot M^{-1} \cdot G \cdot q$$

Beim natürlichen Hören ist infolge der Lokalisationsreizselektion  $D_N \cdot M^{-1} = 1$  und somit  $q'_N = G \cdot q$ .

Auch bei Kopfhörerwiedergabe von **nicht** kopfbezogenen Signalen adaptiert  $M^{-1}$ , und zwar auf die Verhältnisse für „Lautsprecherentfernung Null“ (vgl. 3.5.). Dies führt zur Im-Kopf-Ortung in Verbindung mit G. Für die Klangfarbenbestimmung ist wegen  $D = 1$  deshalb auch  $M^{-1}$  ohne Einfluß. Es gilt daher  $D_K \cdot M^{-1} = 1$  und somit  $q'_K = C_X \cdot G \cdot q$ .

In beiden Darbietungsfällen ist also die Klangfarbe konstant, auch beim natürlichen Hören unabhängig von der Schalleinfallrichtung. Es ist infolge der adaptiven Funktion von  $M^{-1}$  nicht möglich, durch Gleichsetzen der beiden Gleichungen  $C_X$  zu bestimmen. Doch es gibt die Möglichkeit, die Wirkung von  $M^{-1}$  zu unterdrücken: Die Lokalisationsreize sind zerstört, wenn ein Ohr geschlossen ist; eine Klangverfärbung durch die Wirkung der Außenohrübertragungsfunktion ist wahrnehmbar. In diesem Fall gilt damit:

$$q'_N = D_N \cdot G \cdot q$$

Aus der geforderten Klangfarbenäquivalenz beim einohrigen Hören folgt also mit  $q'_N = q'_K$  die Forderung

$$C_X = D_N$$

Analog zur optimalen Kunstkopfentzerrung ergibt sich die optimale Kopfhörerentzerrung durch Integration von  $D_N$  über alle Schalleinfallrichtungen.

Ebenso wie für die Wiedergabe kopfbezogener Signale über Lautsprecher ist für die Wiedergabe raumbezogener Signale über Kopfhörer also eine Entzerrung optimal, die sich auf das Diffusfeld bezieht. Der Bezug auf eine bestimmte Schalleinfallrichtung im Freifeld ist ungünstig. Insbesondere der Bezug auf die Schalleinfallrichtung „vorne“ führt dazu, daß die „8-kHz-Senke“ die Klangfarbe beeinträchtigt [6].

Dieses Ergebnis bestätigt die Erfahrungen, die man mit der zur Zeit üblichen Freifeldentzerrung nach DIN 45 619 gemacht hat [6].

**Allgemein gilt**, daß für die Entzerrung der Schnittstelle zwischen Aufnahme- und Wiedergabe-seite die Gesamtheit aller Übertragungsfunktionen des Außenohres durch eine entsprechende mittlere Übertragungsfunktion zu ersetzen ist, sobald kopfbezogene Signale über Lautsprecher oder raumbezogene Signale über Kopfhörer abgehört werden sollen. In beiden Übertragungsfällen kann das Gehör die vorhandenen spektralen Ohrsignalmerkmale, die sich aus der aufnahme- oder wiedergabeseitigen räumlichen Codierung ableiten, nicht decodieren. Infolgedessen gelangen die spektralen Merkmale „unverrechnet“ an die Gestaltassoziationsstufe, sie beeinflussen die Klangfarbe.

## 5. Ergebnis

Das Assoziationsmodell erweitert das bisherige Verständnis über die Funktion des Gehörs durch zwei bedeutsame Eigenschaften:

1. Die Hörereigniseigenschaften resultieren aus der Wirkung von zwei unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen, einer für die Selektion des Ortes und ein zweiter, höher gelagerter Prozeß für die Selektion der Gestalt.
2. Die ortsbestimmende Verarbeitungsstufe hat die Eigenschaft, die räumliche Information des ankommenden Signals mit Hilfe eines ortsangepaßten adaptiven Filters zu decodieren, darüber hinaus aber die Gestaltinformation von der Ortsinformation zu trennen und der gestaltbestimmenden Stufe zuzuführen.

Die adaptive und diskriminierende Funktion der ortsbestimmenden Verarbeitungsstufe erklärt die Phänomene des räumlichen Hörens einheitlich. Der Ansatz hat Konsequenzen sowohl für zukünftige Untersuchungen als auch auf dem Gebiet der elektroakustischen Übertragung.

Insbesondere sagt das Modell den Zusammenhang zwischen Hörereignisort und Klangfarbe voraus. Daraus läßt sich eine Definition für die optimale Entzerrung von Kunstköpfen und Kopfhörern ableiten. Als „Universalschnittstelle“ zwischen Aufnahme- und Wiedergabeseite wird eine Entzerrung vorgeschlagen, die sich grundsätzlich auf das Diffusfeld bezieht.

Der Verfasser dankt den Prof. Dres. J. Blauert, G. Boerger, L. Cremer, G. Plenge sowie Dr. P. Schöne für wertvolle Anregungen und Diskussionen.

## SCHRIFTTUM

- [1] Schlemm, W.: Kunstkopf-Stereophonie — eine Alternative zur Quadrofonie? Funkschau 46 (1974), S. 771 bis 774.
- [2] Steinke, G.: Möglichkeiten und Grenzen der kopfbezogenen Stereophonie. Teil 1 und 2. radio fernsehen elektronik 28 (1979), H. 6 und 7, S. 388 bis 392 und S. 456 bis 466.
- [3] Theile, G.: „Kunstkopf“ Stereophony: Results of recent investigations and development of a new Kunstkopf system. IBC 80, Brighton. Conf. Publ. No. 191, S. 350 bis 353.
- [4] Huddle, H.; Schröter, J.: Verbesserungen am Neumann-Kunstkopfsystem. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), S. 1 bis 6.
- [5] Theile, G.: Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsabbildung. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), S. 67 bis 73.
- [6] Theile, G.: Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereofonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Klangfarbe. Rundfunktech. Mitt. 25 (1981), in diesem Heft.
- [7] Wendt, K.: Das Richtungshören bei der Überlagerung zweier Schallfelder bei Intensitäts- und Laufzeitstereophonie. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1963.
- [8] Theile, G.: Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld. Dissertation. Technische Universität Berlin, 1980.
- [9] Plenge, G.: Über das Problem der intracranialen Ortung von Schallquellen bei der akustischen Wahrnehmung des Menschen. Habilitationsschrift. Technische Universität Berlin, 1973.
- [10] Cremer, L.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band I. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1948.
- [11] Cherry, E. C.: Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears. J. of Acoust. Soc. Am. 25 (1953), S. 975 bis 979.
- [12] Cherry, E. C.; Taylor, W. K.: Some further experiments upon recognition of speech, with one and with two ears. J. of the Acoust. Soc. Am. 26 (1954), S. 554 bis 559.
- [13] Platte, H.-J.: Zur Bedeutung der Außenohrübertragungseigenschaften für den Nachrichtenempfänger „menschliches Gehör“. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1979.
- [14] Plenge, G.; Tilse, U.: Cocktail-Party-Effekt with and without conflicting visual cues. 50th AES Convention, London 1975.
- [15] Blauert, J.: Räumliches Hören. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1974.
- [16] Blauert, J.: Untersuchungen zum Richtungshören in der Medianebene bei fixiertem Kopf. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1969.
- [17] Marko, H.: Ein Funktionsmodell für die Aufnahme, Speicherung und Erzeugung von Informationen im Nervensystem. Röntgen-Blätter 24 (Nov. 1971).
- [18] Keidel, W. D.: Informationsverarbeitung. In: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. Hrsg. v. W. D. Keidel. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1973, S. 385 bis 401.
- [19] Engel, W.: Eine neue Methode zur Entkopplung mehrfach geregelter Systeme. Dissertation. Technische Hochschule München, 1966.
- [20] Theile, G.: Weshalb ist der Kammfiltereffekt bei Summenlokalisation nicht hörbar? Vortrag auf der 11. Tonmeistertagung in Berlin, Nov. 1978.
- [21] Laws, P.: Zum Problem des Entfernungs Hörens und der Im-Kopf-Lokalisiertheit von Hörereignissen. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1972.
- [22] Roeser, D.: Schallrichtungsbestimmung bei krankhaft verändertem Gehör. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1965.
- [23] Klemm, O.: Lokalisation von Sinneseindrücken bei disparaten Nebenreizen. Psychol. Stud. 5 (1909), S. 73 bis 162.
- [24] Blauert, J.: Ein Versuch zum Richtungshören bei gleichzeitiger optischer Stimulation. Acustica 23 (1970), S. 118 bis 119.
- [25] Massaro, D. W.; Warner, D. S.: Dividing attention between auditory and visual perception. Perception & Psychophysics 21 (1977), S. 569 bis 573.

- [26] Lehninger, F. J.: Über die Beeinflussung der Hörereignisrichtung durch das Sehereignis bei der Personendarstellung in Telekonferenzen. *Acustica* 42 (1979), S. 240 bis 248.
- [27] Plenge, G.: Über das Problem der Im-Kopf-Lokalisation. *Acustica* 26 (1972), S. 241 bis 252.
- [28] Plenge, G.: On the differences between localization and lateralization. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 56 (1974), S. 944 bis 951.
- [29] Jeffress, L. A.; Taylor, R. W.: Lateralization versus localization. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 33 (1961), S. 482 bis 483.
- [30] Flechtner, H. J.: Grundbegriffe der Kybernetik. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1972.
- [31] Caspers, H.: Zentralnervensystem. In: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. Hrsg. v. W. D. Keidel. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1973, S. 467 bis 524.
- [32] Fukushima, K.: A model of associative memory in the brain. *Kybernetik* 12 (1973), S. 58 bis 63.
- [33] Poggio, T.: On optimal nonlinear associative recall. *Biol. Cybernetics* 19 (1975), S. 201 bis 209.
- [34] Kohonen, T.; Reukala, E.; Maekisara, K.; Vainio, L.: Associative recall of images. *Biol. Cybernetics* 21 (1976), S. 159 bis 168.
- [35] Kohonen, T.; Oja, E.: Fast adaptive formation of orthogonalizing filters and associative memory in recurrent network of neuron-like elements. *Biol. Cybernetics* 21 (1976), S. 85 bis 95.
- [36] Kohonen, T.: Associative memory. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1977.
- [37] Wess, O.; Röder, U.: A holographic model for associative memory chains. *Biol. Cybernetics* 27 (1977), S. 89 bis 98.
- [38] Bohn, G.: A structure for associative information processing. *Biol. Cybernetics* 29 (1978), S. 193 bis 200.
- [39] Fukushima, K.; Miyake, S.: A self-organizing neural network with a function of associative memory: Feedback-type cognitron. *Biol. Cybernetics* 28 (1978), S. 201 bis 208.
- [40] Murakami, K.; Akaishi, S.; Aibara, T.: On optimal associative recall by an incomplete key. *Biol. Cybernetics* 30 (1978), S. 95 bis 97.
- [41] Wigström, H.: A model of a neural-network with recurrent inhibition. *Kybernetik* 16 (1974), S. 103 bis 112.
- [42] Willwacher, G.: Fähigkeiten eines assoziativen Speichersystems im Vergleich zu Gehirnfunktionen. *Biol. Cybernetics* 24 (1976), S. 181 bis 198.
- [43] Zwicker, E.; Feldtkeller, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.
- [44] Duifhuis, H.: Perceptual analysis of sound. Dissertation. Technische Hochschule Eindhoven, 1972.
- [45] Blauert, J.; Cobben, W.: Some considerations of binaural cross correlation analysis. *Acustica* 39 (1978), S. 96 bis 104.
- [46] Schenkel, K. D.: Accumulation theory of binaural-masked thresholds. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 41 (1967), S. 20 bis 31.
- [47] Durlach, N. I.: Equalization and cancellation theory of binaural masking-level differences. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 35 (1963), S. 1206 bis 1218.
- [48] Osman, E.: A correlation model of binaural masking level differences. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 50 (1971), S. 1494 bis 1511.
- [49] Terhardt, E.: Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. Teil I und II. *Acustica* 26 (1972), S. 173 bis 186 und S. 187 bis 199.
- [50] Warncke, H.: Die Grundlagen der raumbezüglichen stereophonischen Übertragung im Tonfilm. *Akust. Z.* 6 (1941), S. 174 bis 188.
- [51] Leahey, D. M.: Some measurements on the effects of interchannel intensity and time differences in two channel sound systems. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 31 (1959), S. 977 bis 986.
- [52] Franssen, N. V.: Stereophonie. Philips Tech. Bibl., Eindhoven 1963.
- [53] Makita, Y.: On the directional localisation of sound in the stereophonic sound field. *E.B.U. Rev. Part A Tech. No.* 73, June 1962, S. 102 bis 108.
- [54] Mertens, H.: Directional hearing in stereophony — Theory and experimental verification. *E.B.U. Rev. Part A Tech. No.* 92, August 1965, S. 146 bis 158.
- [55] Damaske, P.; Meller, V.: Ein Verfahren zur richtungstreu Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher. *Acustica* 22 (1969/70), S. 153 bis 162.
- [56] Gardner, M. B.: Image fusion, broadening and displacement in sound location. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 46 (1969), S. 339 bis 349.
- [57] Blauert, J.; Laws, P.: Verfahren zur orts- und klanggetreuen Simulation von Lautsprecherbeschallungen mit Hilfe von Kopfhörern. *Acustica* 29 (1973), S. 273 bis 277.
- [58] Wischgoll, K. J.: Kunstköpfe hören und sprechen. *radio mentor electronic* 40 (1974), S. 276 bis 278.
- [59] Franssen, N. V.: Some considerations of the mechanism of direction hearing. Dissertation. Technische Hochschule Delft, 1960.
- [60] Wendt, K.: Das Richtungshören bei Zweikanal-Stereophonie. *Rundfunktech. Mitt.* 8 (1964), S. 171 bis 179.
- [61] Platte, H.-J.; Laws, P.: Technische Probleme beim Einsatz kopfbezogener stereofoner Übertragungsverfahren. *Rundfunktech. Mitt.* 22 (1978), S. 22 bis 27.
- [62] Schröter, J.: Katalog von Außenhörübertragungsfunktionen. Ruhruniversität Bochum, 1980.

Herausgeber: Institut für Rundfunktechnik GmbH, München.

ISSN 0035-9890

Schriftleitung: Dipl.-Ing. H. Fix, Prof. Dr. U. Messerschmid, Floriansmühlstraße 60, 8000 München 45; Dr. R. Thiele, Bertramstraße 8, 6000 Frankfurt/Main 1; Dipl.-Ing. I. Dahrendorf, Appellhofplatz 1, 5000 Köln 1.

Redaktion: Ing. (grad.) R. Hengstler, H. Stiebner, Floriansmühlstraße 60, 8000 München 45, Ruf (089) 38 59 383, Fernschreiber 5/215 605 irtm d.

Redaktioneller Beirat: Dipl.-Ing. H. Eden, Dr. N. Mayer, Prof. Dr. G. Plenge, Floriansmühlstr. 60, 8000 München 45.

Verlag: Mensing GmbH + Co KG, Schützenwall 9—11, 2000 Norderstedt. Alle Rechte vorbehalten. Nachdrucke, auch auszugsweise sowie anderweitige Vervielfältigungen sind nur mit schriftlicher Genehmigung des Verlages gestattet.

Anzeigenverwaltung: Mensing GmbH + Co KG, Schützenwall 9—11, 2000 Norderstedt, Ruf (040) 5 25 20 11 und alle Werbemittler. Zur Zeit gilt Anzeigenpreisliste Nr. 12.

Gesamtherstellung: Mensing GmbH + Co KG, Schützenwall 9—11, 2000 Norderstedt, Ruf (040) 5 25 20 11.



**Kunstkopf-Demonstration 30.11.81**

**Teil A : Aufnahmen mit dem neuen Kunstkopf KU 81 (Neumann)**

- 1) Umgang im Vortragssaal des IRT
- 2) Entfernungsdarstellung im Freien
- 3) Straßenlärm
- 4) Höreindrücke von einer Fernsehproduktion mit der Gruppe "Hesperion XX" 3'45  
Großer Sendesaal im Haus des Rundfunks, Berlin (SFB)
- 5) Ludwig v. Beethoven : 2. Symphonie  
Radio-Symphonie-Orchester Berlin  
Großer Sendesaal im Haus des Rundfunks, Berlin (SFB)
- 6) Antonin Dvorak : Symphonie Nr. 7, d-moll 3'43  
Symphonie-Orchester des Bayerischen Rundfunks / B. Haitink  
Herkulesaal, München (BR)

**Teil B : Darstellung der Stereokompatibilität bei Lautsprecherwiedergabe**

**Vergleich mit dem alten KU 80 und dem neuen KU 81 (Neumann)**

- |    |                                                                                                                                                       |                                             |      |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------|
| 1) | Antonin Dvorak : Slawischer Tanz Op. 46<br>Radio-Symphonie-Orchester Berlin<br>V. Smetacek<br>Großer Sendesaal im Haus des Rundfunks,<br>Berlin (SFB) | Alter Kunstkopf<br>und Stereo<br>im Wechsel | 1'12 |
| 2) | Ludwig v. Beethoven : 2. Symphonie<br>Radio-Symphonie-Orchester Berlin<br>Großer Sendesaal im Haus des Rundfunks,<br>Berlin (SFB)                     | Neuer KK<br>und Stereo<br>im Wechsel        | 2'53 |
| 3) | Michael Praetorius : Missa<br>Monteverdi-Chor / J. Jürgens<br>Trinitatiskirche Hamburg<br>(SFB)                                                       | Neuer KK<br>und Stereo<br>im Wechsel        | 5'00 |





# KUNSTKOPFSTEREOFONIE

VERBESSERUNGEN AM KUNSTKOPFSYSTEM FÜR DEN EINSATZ IM RUNDfunk



Seit der ersten Kunstkopfsendung zur Internationalen Funkausstellung Berlin 1973 besteht bei den Rundfunkanstalten, besonders aber auf der Hörerseite, ein lebhaftes Interesse an der KunstkopfsterEOFonie. Doch trotz ihrer vielen Vorteile gegenüber IntensitätssterEOFonie und Quadrofonie hat sich diese Technik noch nicht durchsetzen können.

Die Ursachen dafür sind vielfältig. Es sind vor allem zwei Mängel am bisher in den Rundfunkanstalten gebräuchlichen Kunstkopf KU 80 (Neumann):

## 1. Abbildungsfehler

besonders Übertragungsfehler bei der Abbildung von Schallquellen im Bereich „vorne“.

## 2. Klangfarbenfehler

besonders bei Wiedergabe der Kunstkopfsignale über Lautsprecher.

Beide Mängel sind am verbesserten Kunstkopf KU 81 weitgehend behoben worden:

### Zu 1.:

Nach Untersuchungen an der Ruhruniversität Bochum wurden die richtungsabhängigen Übertragungseigenschaften besser an die eines „typischen“ Hörers angepaßt. Die verbesserte Richtcharakteristik des neuen Kunstkopfes ergibt sich aus mehreren Einzelmaßnahmen:

- a) die Trommelfellimpedanz brauchte nicht nachgebildet zu werden.
- b) Mit einem speziellen „Strukturmittlungsverfahren“ wurde eine typische Ohrmuschel gefunden und sehr genau nachgebildet.
- c) Das Material der künstlichen Ohrmuschel ist ebenso weich, wie das der natürlichen Ohrmuschel.
- d) Die Position und der Anstellwinkel der Ohrmuschel entsprechen genau den Verhältnissen am typischen natürlichen Kopf.

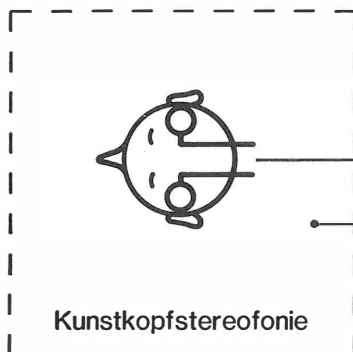
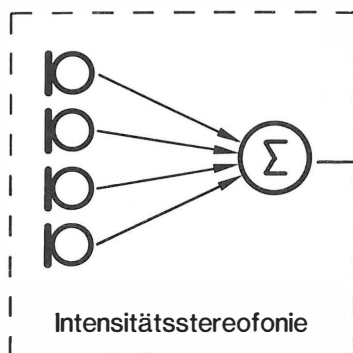
### Zu 2.:

Das Problem der „Lautsprecherkompatibilität“ wurde am Institut für Rundfunktechnik untersucht. Gefordert wurden Kunstkopfsignale, die auch mit einer normalen Stereoanlage über zwei Lautsprecher wiedergegeben werden können, so daß auch der „Normalhörer“ ohne Qualitätsverlust hören kann. Bisher hatte man versucht, einen befriedigenden Klangeindruck durch die sogenannte „Freifeldentzerrung“ des Kunstkopfes zu erzielen. Man ging davon aus, daß jedes Mikrofonsignal, welches für die Wiedergabe über entsprechend freifeldentzerrte Kopfhörer geeignet ist, im Prinzip ebenso geeignet ist für die Wiedergabe über Lautsprecher. Es hat sich jedoch gezeigt, daß eine derartige Freifeldanpassung wegen der frequenzabhängigen Richtcharakteristik des Kunstkopfmikrofons nur dann zu klangverfärbungsfreier Lautsprecherwiedergabe führt, wenn die

Schalleinfallrichtung am Kunstkopf mit der Bezugsrichtung seiner Entzerrung übereinstimmt. Eine Freifeldentzerrung kann immer nur für eine Schalleinfallrichtung zutreffen, beeinflusst aber das Übertragungsmaß für alle Schalleinfallrichtungen. Das bedeutet, daß auch der für den Klangeindruck entscheidende Frequenzgang des sogenannten „Diffusfeldübertragungsmaßes“ von der gewählten Freifeld-Bezugsrichtung abhängt. – In Hinblick auf die üblichen Anforderungen an die in der Studioteknik gebräuchlichen Stereomikrofone wurde deshalb der neue Kunstkopf so entzerrt, daß nicht ein bestimmter Freifeldfrequenzgang, sondern sein Diffusfeldfrequenzgang eben ist. Er erweist sich damit in der Praxis als kompatibel mit Koinzidenzmikrofonen.

Die Diffusfeldentzerrung wird durch eine grundsätzlich neue Mikrofonankopplung erreicht, die in Zusammenarbeit mit der Firma Neumann entwickelt wurde: Der Ohrkanal ist nur in einer Länge von etwa 4 mm vorhanden. Das ist der Abschnitt, der vom äußeren Schallfeld richtungsabhängig beeinflusst wird. Dahinter folgt ein Anpaßstück als Übergang vom Ohrkanaldurchmesser zum Kapseldurchmesser, das auch akustische Glieder für die gewünschte Diffusfeldentzerrung enthält. Es ist vorgesehen, die gesamte Entzerrung auf akustischem Wege herzustellen, damit der Kunstkopf ohne Zusatzgeräte das gewünschte Signal abgibt. Die im KU 80 verwendeten Mikrofone (KM 83 spez.) werden weiterhin eingesetzt.

## AUFNAHME

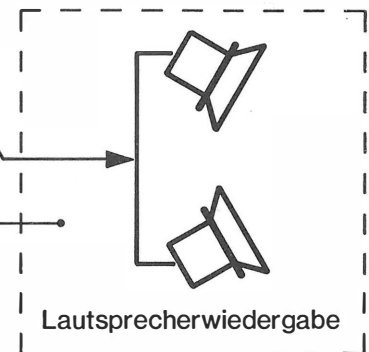
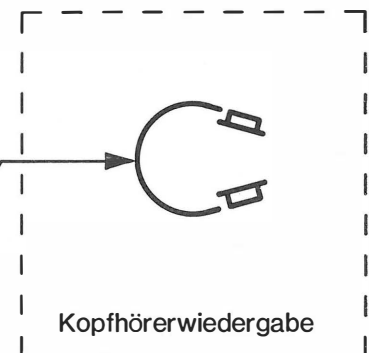


Sender

Empfänger

Kunstkopfaufnahmen liefern bei Lautsprecherwiedergabe einen ebenso befriedigenden Klangeindruck wie intensitätsstereofone Aufnahmen.

## WIEDERGABE



**Je nach Aufnahmesituation kann der Tonmeister das geeignete Aufnahmeverfahren wählen: Intensitätsstereofonie oder Kunstkopfstereofonie.**

**Der Hörer kann frei zwischen Kopfhörer- und Lautsprecherwiedergabe wählen, ohne Klangfarbenfehler befürchten zu müssen.**