

Dipl.-Ing. GERHARD STEINKE

Mitteilung aus dem Rundfunk- und Fernseh-technischen Zentralamt der Deutschen Post

Mit Einführung der Kunstkopf-Stereophonie beim Rundfunk der DDR am 4. Oktober 1976 wurde der Hörer mit einer neuen Form der Informationsvermittlung bekanntgemacht. Es erforderte viele Jahre internationaler Entwicklung, bis der Beginn von Experimentaltendenzen für die Allgemeinheit vertretbar erschien. Dabei ist auch zum gegenwärtigen Zeitpunkt das Verfahren noch nicht als ausgereift anzusehen. Eine Reihe technischer und psycho-akustischer Probleme sowohl auf der Aufnahme- als auch auf der Wiedergabe-seite beeinflussen die Qualität der Übertragung vom Studio zum Hörer.

Inzwischen wurden vielseitige Bemühungen zur zweckmäßigen Weiterentwicklung und Behebung der Übertragungsfehler bekannt. Im folgenden wird ein Überblick über den Stand der kopfbezogenen Stereophonie, aber auch allgemein über die Probleme bei der Wiedergabe mit Kopfhörern gegeben. Dabei wurde es auch als sinnvoll angesehen, die Probleme der Wiedergabe kopfbezogener Aufnahmen über Lautsprecher mit einzubeziehen.

1. Begriffsbestimmung

Mit „kopfbezogener Stereophonie“ bezeichnet man (im Vergleich zur „raumbezogenen Stereophonie“ mit Lautsprechern [1]) ein Übertragungsverfahren, das folgende wesentliche Kennzeichen aufweist (s. Bild 1):

- zwei unabhängige Übertragungskanäle
- ein einziges Aufnahmeorgan, das den Kopf des Hörers vertritt (der Zusatz von Stützmikrofonen, wenn er in geeigneter Weise erfolgt, ist im allgemeinen keine Abweichung im Sinne dieser Definition, s. Abschn. 7), und zwar einen sog. künstlichen Kopf (Kunstkopf) als Aufnahmeorgan (s. Bild 1a, als Äquivalent zu einer Testperson mit Sondenmikrofonen im Ohrkanal, s. Bild 1b)
- Wiedergabe mit Hilfe von Kopfhörern
- die örtliche Beziehung zwischen dem Hörereignisort und dem Ort des Aufnahmeorgans innerhalb des kopfbezogenen Koordinatensystems ist bei der Aufnahme und der Wiedergabe gleich.

Eine solche Übertragung ist dann optimal, wenn die Ohrsignale einer Testperson bei der Wiedergabe denen zum Zeitpunkt der Aufnahme entsprechen.

Die rasche Verbreitung und die inzwischen erreichte Beliebtheit des kopfbezogenen Stereo-Übertragungsverfahrens führte zu der Bezeichnung „Kunstkopf-Stereophonie“.

2. Zielstellung bei kopfbezogener im Vergleich zu raumbezogener Stereophonie

Eine optimal naturgetreue (originalgetreue) Übertragung war bisher für den Rundfunk

(analog Schallplatte) weder wünschenswert noch mit den raumbezogenen Ein- und Mehrkanalverfahren bekannter Art erreichbar [2].

Bei den Anforderungen an eine Übertragung muß man sich auf eine optimale Originalähnlichkeit beschränken. In Anlehnung an die Definition von Blauert [3] kann ein stereofones Übertragungssystem dann als für diese Aufgabe „ideal“ bezeichnet werden, wenn es charakteristische Schallereignismerkmale so überträgt, daß die Hörereignisse bei der Aufnahme, d. h. im Originalschallfeld, und bei der Wiedergabe sich weitestgehend entsprechen, und zwar hinsichtlich ihrer eigenschaftlichen, räumlichen und zeitlichen Merkmale.

Die bekannten raumbezogenen Übertragungsverfahren (Zweikanal-Stereophonie, Quadrophonie) erfüllen derartige Idealbedingungen nicht bzw. nur teilweise. Mit zwei bzw. vier Lautsprechern wird innerhalb der jeweiligen Basis ein synthetisches Schallfeld erzeugt, das verschiedene Einschränkungen gegenüber dem am Ursprungsort existierenden aufweist. Bei der Zweikanal-Stereophonie liegen die Hörereignisorte meist innerhalb der Lautsprecherbasis (Bild 2). Es wird ein Hörereignis erzeugt, bei dem die Direktinformationen gegenüber den Rauminformationen im Vergleich zu dem Hörereignis am Originalort in bestimmter Weise bevorzugt sind. Die räumliche Einbeziehung ist unvollkommen.

Zur Verbesserung der räumlichen Komponente entstanden bemerkenswerte Weiterentwicklungen wie Stereo-Ambiofonie,

Pseudo-Quadrophonie und Quadrophonie; vier Kanäle reichen aber nicht aus, um z. B. das Schallfeld an einem Platz im Konzertsaal oder Studio originalähnlich zu synthetisieren. Die erreichten Fortschritte waren nicht entscheidend genug und erfordern noch zu hohen ökonomischen Aufwand [2]. Sie konnten sich daher bisher nicht für eine allgemeine Anwendung durchsetzen.

Es kann daher auch aus heutiger Sicht noch als eine richtige Einstellung zur raumbezogenen Übertragung angesehen werden, wenn es als vorrangige Aufgabe einer solchen Übertragungsform gilt, für den Hörer in seinem Wohnraum die Voraussetzungen für ein bestmögliches Hörerlebnis zu schaffen [4] [5] [6]. Mit Hilfe einer entsprechenden Bearbeitungstechnologie werden wesentliche Schallereignismerkmale dazu benutzt, ein befriedigendes Hörerlebnis einschließlich seiner Zuordnung im Raum sowie seiner akustischen Umgebung zu erzeugen, wobei der fehlende optische Eindruck durch Bevorzugung bestimmter akustischer Eindrücke gemildert oder gar weitgehend kompensiert werden kann. Dadurch kann eine optimale Vorstellung vom jeweiligen Schallereignis vermittelt werden.

Rundfunk und Schallplatte gelangten nach Durchlaufen verschiedener Entwicklungsstufen zu einem spezifischen Reproduktionsstil, dessen klangliches Erlebnis bemerkenswerte und oftmals vorteilhafte Unterschiede zum Eindruck im Konzertsaal (auch an den besten Plätzen) aufweist. So gewonnene Hörereignisse sind keine „Abbildungen“, sie wirken als medienspezifische Interpretationen von Künstlern und Aufnahmepersonal gemeinsam, als werkgerechte Nachschöpfungen. Auf dieser Grundlage entwickelten sich auch eigene künstlerisch-ästhetische Maßstäbe. Das ist vor allem verständlich, wenn man mit der Einkanalübertragung vergleicht, die nur eingeschränkte Möglichkeiten zur ausreichenden Durchsichtigkeit und Differenzierung des Klanges bietet. Auf weitere Vorzüge und Mängel der raumbezogenen Übertragung sei hier nicht eingegangen; es sei dazu auf [2] verwiesen. Wie kann nun die Zielstellung eines idealen Übertragungsverfahrens wie das der kopfbezogenen Stereophonie eingeordnet werden?

Durch die im o. a. Sinne ideale Übertragung von Direkt- und Rauminformationen für den gesamten Hörereignisraum (\approx Hörperspektive) ist bevorzugtes Ziel der kopfbezogenen Stereophonie eine weitgehend

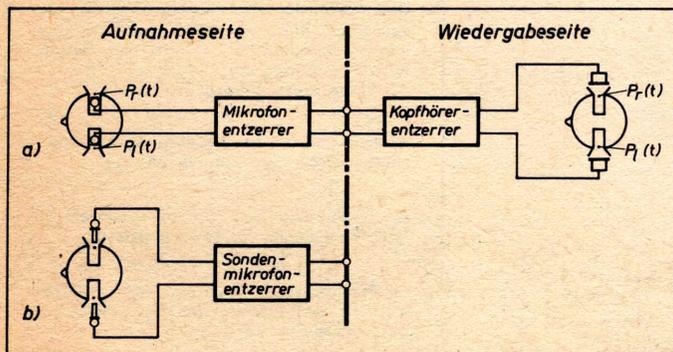


Bild 1: Prinzip der kopfbezogenen Übertragung (nach [8]). a) Kunstkopf mit Aufnahmemikrofonen – Mikrofonentzerrer – Kopfhörerentzerrer – natürlicher Kopf mit aufgesetzten Kopfhörern; b) Kunstkopf bzw. natürlicher Kopf mit Sondenmikrofonen und Mikrofonentzerrer (Wiedergabe analog a)

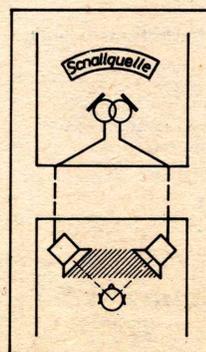


Bild 2: Prinzip der raumbezogenen Zweikanal-Stereophonie (Intensitäts-Stereophonie)

realistische Raumabbildung mit der Möglichkeit, den Hörer in die jeweilige akustische Atmosphäre einzubeziehen und ihm die Vorstellung zu vermitteln, unmittelbar am Originalort (Aufnahmeort) anwesend zu sein.

Die Darstellungsmöglichkeit des gesamten Hörereignisraumes erlaubt die Vermittlung des gewünschten Raumeindrucks (ob Szene im Freien oder im Hallraum bzw. Konzertsaal) sowie die Lokalisation von räumlichen Hörereignismerkmalen in der gesamten Hörperspektive bis zur unmittelbaren Nähe des Ohres, einschließlich beliebiger Bewegungen der fiktiven Schallquellen in verschiedenen Abbildungsebenen entsprechend den realen Verhältnissen am Originalort. Dazu kommt die Möglichkeit der Simulation spezifisch-kopfbezogener Hörereignisse, die mit der raumbezogenen Stereophonie nicht realisiert werden können. Da Einflüsse des Wiedergaberaumes wie Störschall u. ä. weitgehend entfallen, könnte die volle Dynamik des Schallereignisses übertragen werden. Künstliche Beeinträchtigungen durch Dynamikregelung werden somit vermieden. Lediglich die Grenzen des HF-Übertragungsweges bedingen eine Einschränkung.

In [7] wird herausgestellt, daß bei Kunstkopf-Stereophonie die Abbildungsebenen der verschiedenen Hörereignisse durch die Wahl des Standortes des Aufnahmeorgans zum Geschehen und durch die technische Realisierung direkt bestimmt werden. Der kommunikative und der inhaltliche Aspekt einer Übertragung treten in den Vordergrund. Damit ergeben sich Voraussetzungen, den Hörer mehr zum aktiven Hören anzuregen bzw. in das akustische Geschehen einzubeziehen.

Die volle Realisierung dieser Zielstellung ist auf Grund einiger Übertragungsmängel bei der Kunstkopf-Stereophonie noch nicht möglich. Solange eine optimale Originalähnlichkeit nicht erreichbar ist, entwickelt sich jedoch eine Aufnahmetechnologie, die zumindest die Imagination einer solchen Originalähnlichkeit und Bevorzugung bestimmter künstlerischer Wirkungen anstrebt.

Die Zielstellungen und die Möglichkeiten der beiden Verfahren sind im allgemeinen nicht untereinander austauschbar. Beide Verfahren haben daher nebeneinander ihre Existenzberechtigung.

3. Forderungen und Merkmale der „idealen“ kopfbezogenen Stereoübertragung

Aus den vorstehend geschilderten Überlegungen heraus muß für die kopfbezogene Übertragung eine optimale Originalähnlichkeit erwartet werden. Erzielt werden kann das jedoch nur, wenn die Ohrsignale einer Testperson bei der Wiedergabe mit denen zum Zeitpunkt der Aufnahme möglichst gut übereinstimmen.

Nachgewiesen wurde das in [8]. Unter Verwendung von Sondenmikrofonen wurden Ohrsignale in einer Meßebene 4 mm hinter dem Ohrkanaleingang aufgenommen. Diese Ebene (s. Bild 3) ist einerseits weit genug vom Ohreingang entfernt, so daß der gemessene Übertragungsfaktor des folgenden Ohrkanals bis zum Trommelfell praktisch unabhängig von der Schalleinfallrichtung und -entfernung ist; andererseits ist sie auch weit genug vom Trommelfell entfernt, um wechselseitige Einflüsse so-

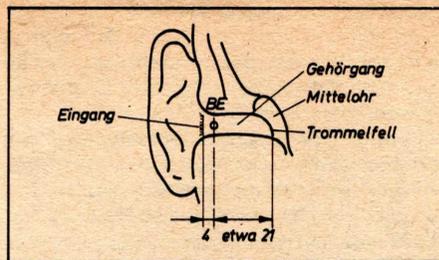


Bild 3: Lage der Bezugsebene BE zur Abtastung der Ohrsignale (nach [8])

wohl durch das Sondenmikrofonrohr als auch durch den Trommelfellabschluß vernachlässigen zu können.

Die durch die Sondenmikrofone verursachten linearen Verzerrungen im interessierenden Bereich von 40...15 000 Hz müssen mit Hilfe eines speziellen Netzwerkes (Mikrofonentzerrer) entzerrt werden (s. Bild 1b). Die Wiedergabe der Signale erfolgt über Kopfhörer. Dazu müssen die linearen Verzerrungen des zu verwendenden Kopfhörers für die Bezugsebene im Ohr kompensiert werden. Hierzu dient der im Bild 1a (rechts) eingefügte Kopfhörerentzerrer. Durch diese Wahl der Bezugsebene wird gewährleistet, daß der Ohrkanal nicht wie bei den bisherigen Systemen zweimal durchlaufen wird, und Signalverfälschungen werden vermieden.

Dieser Idealfall ist allerdings auf die Position bei unbewegtem Kopf in beiden Situationen begrenzt. Bei der Wiedergabe bleiben die Signale ohne zusätzliche Maßnahmen bei Kopfdrehung unverändert.

Da wir wissen, daß die unbewußten Kopfdrehungen einer Erhöhung der Ortungsschärfe, aber auch einer Unterstützung des intelligenten Hörens, der Konzentration auf bestimmte Hörereignisanteile und Unterdrückung von unerwünschtem Stör- und Raumschall dienen können, ist diese Einschränkung auch Veranlassung, nach Lösungen zur Behebung dieses Mangels zu suchen (s. Abschn. 4.).

Der geschilderte Idealfall ermöglicht dennoch nachweisbar (s. u. a. in [8]) eine richtungsgetrene, entfernungsgetrene und klangfarbengetrene Übertragung von räumlichen Schallereignismerkmalen und erfüllt somit die Bedingung der weitgehenden Ähnlichkeit der Hörereignisse bei der Aufnahme und Wiedergabe.

Damit ist es möglich, Hörereignisse zu vermitteln, die im Vergleich zur raumbezogenen Übertragung mit Lautsprechern vor allem folgende bemerkenswerte und z. T. schon erreichbare Aspekte aufweisen:

- überzeugende Darstellung des Ursprungsraumes, insbesondere hinsichtlich Halligkeit, Verteilung der frühen Reflexionen nach Richtung und Zeit, Räumlichkeit. Dadurch wird die akustische Atmosphäre entsprechend dem gewohnten Höreindruck beim natürlichen Hören (optische Eindrücke bzw. durch Erfahrung in bestimmten Räumen erworbene Kenntnisse völlig ausgeschaltet) empfunden. Das gilt besonders für die Extreme „im Freien“ und „im Hallraum“
- Darstellung beliebiger Hörereignisorte in der gesamten Hörperspektive bis zur unmittelbaren Nähe des Ohres einschließlich der korrekten Übermittlung

beliebiger Bewegungen der Schallquellen auf Grund der entfernungs- und richtungsgetreuen Abbildung der realen Verhältnisse auf der Aufnahme- und Wiedergabe- (AKL)

- Wegfall einer sonst bei Verwendung von Kopfhörern üblichen „Im-Kopf-Lokalisation“ (IKL)
- hohe Durchsichtigkeit und Richtungsauflösung sowohl durch die exakte Lokalisierbarkeit als auch durch Anwendung des intelligenten Hörens (Hörschärfe lediglich begrenzt durch die unbewegte Position des Kopfes bei Aufnahme und Wiedergabe)
- korrekte Vermittlung der Klangfarbe des Schallereignisses am Ort des Aufnahmeorgans. Diese Klangfarbentreue fördert auch die Genauigkeit des Entfernungseindrucks
- kein Einfluß des Wiedergaberaumes auf Grund des kurzen Abstandes Kopfhörer – Ohr (auch bei sogenannten offenen Kopfhörersystemen)
- hohe Dynamik entsprechend der tatsächlichen Dynamik des Schallereignisses, ermöglicht durch den Wegfall sowohl der Einflüsse des Wiedergaberaumes als auch der Begrenzung der zulässigen Abhörlautstärke im Wohnraum (Einschränkung durch HF-Übertragungsweg hier vernachlässigt).

Die Nutzung eines natürlichen Kopfes als Träger von Aufnahmeelementen und somit als Aufnahmeorgan wurde nicht nur als Beweis für die Richtigkeit der Aufgabe, Ohrsignale so genau wie möglich nachzubilden, angewendet, sondern auch zur Durchführung von Übertragungen. Die Verwendung eines natürlichen Kopfes als Träger der Aufnahmeelemente kann sich aber nur auf Experimente beschränken; für den professionellen Bereich ist eine Kopfnachbildung erforderlich, die Aufnahmemikrofone enthält und die die vorstehenden Bedingungen (sowie weitere, s. Abschn. 4.) erfüllt.

Unter der Voraussetzung, daß es gelingt, für die praktischen Zwecke der Rundfunkübertragung derartige Bedingungen zu realisieren und auch auf der Wiedergabe- seite in den erforderlichen Toleranzen die Ohrsignale zu reproduzieren, gibt es für die kopfbezogene Übertragung zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten: Das Verfahren ist besonders prädestiniert für Übertragungen aus Räumen mit bekannt guten akustischen Eigenschaften sowie von Schallereignissen, die vor allem von der akustischen Atmosphäre leben (Darstellung größerer Entfernung und Tiefe, von Aktion und dynamischen Bewegungen usw.). Auf die Eignung für akustische Untersuchungen, z. B. zur Beurteilung des Raumeindrucks, sei hier nicht näher eingegangen, hier setzt der z. Z. erreichte Stand der Technik noch Grenzen, s. a. [27].

Auch die Übertragung von Szenen, die im Freien spielen, kann optimal nur mit kopfbezogener Stereophonie realisiert werden. Ein normaler Abhörraum oder Wohnraum besitzt eine Nachhallzeit von 0,3...0,6 s. Diese erhöht sich subjektiv bei der Lautsprecherwiedergabe noch bis zu einem gewissen Grade, entsprechend der Nachhallzeit des Aufnahmeortes. Die resultierenden akustischen Verhältnisse im Wiedergaberaum erzeugen somit immer die begrenzte Wirkung eines kleinen Raumes

und nicht das Gefühl, im Freien zu sein. Dagegen wirkt die Fähigkeit des Kunstkopferfahrens, Entfernungen von wenigen Zentimetern bis zu großen Abständen zu vermitteln, bei solchen Szenen besonders beeindruckend.

Die Bereicherung des Hörereignisses durch die Übertragung der Raumatmosphäre läßt trotz des fehlenden optischen Eindrucks eine Vorstellung entstehen, wirklich im Ursprungsraum anwesend und mit dem Schallereignis verbunden zu sein.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil der idealen kopfbezogenen Übertragung ist aber auch, daß sowohl das Aufnahmepersonal im Rundfunk als auch die daran teilnehmenden Hörer unter den gleichen Bedingungen, unabhängig von den räumlichen Verhältnissen, abhören und somit die gleichen Hörerlebnisse empfinden können. Die Bedeutung dieser Tatsache wird sich bei weiterer Verbesserung des Verfahrens und Standardisierung der maßgeblichen Parameter auswirken. Vorausgesetzt werden muß aber dabei die Beseitigung einiger signifikanter Mängel, auf die im folgenden eingegangen wird.

4. Übertragungsfehler der gegenwärtig praktizierten kopfbezogenen Stereophonie beim Rundfunk

Gegenwärtig wird bei vielen Rundfunkorganisationen für kopfbezogene Übertragungen der Aufnahmekopf KU 80 nach Kürer, Plenge und Wilkens [9] eingesetzt. Im Vergleich zu den im Abschn. 3. dargelegten Merkmalen einer idealen kopfbezogenen Stereophonie treten bei der Verwendung des Aufnahmekopfes KU 80 folgende Übertragungsfehler auf:

- Die Klangfarbe ist in Abhängigkeit von der Ansprechrichtung und -entfernung mehr oder weniger subjektiv unbefriedigend.
- Die Vorn-Ortung ist ungenügend, d. h., aufnahmeseitig in der vorderen Medianebene, im Bereich von etwa $\pm 15^\circ$ des Kunstkopfes, liegende Schallquellen werden in zahlreichen Fällen als Hörereignisse hinter dem Kopf geortet, als Richtungsinverson, oder es tritt wieder Im-Kopf-Lokalisation auf.
- Es gibt auch in anderen Medianebenen Richtungs- und Entfernungsfehler.
- Es wird eine subjektiv zu große Räumlichkeit vorgetäuscht, das Hörereignis vermittelt bei der Wiedergabe den Eindruck eines größeren R/D-Verhältnisses als das am Ursprungsort empfundene Hörereignis.

Die Ursachen liegen, wie inzwischen erkannt wurde [8], sowohl auf der Aufnahme- als auch auf der Wiedergabeseite. Es ist daher notwendig, stets das Gesamtsystem zu betrachten.

Vergleicht man in einem Gesamtsystem mit korrekter Entzerrung der Aufnahme- und Wiedergabeelemente gemäß Bild 1 den Kunstkopf KU 80 mit dem natürlichen Kopf und Sondenmikrofonen, so zeigen sich beim KU 80 wiederum Klangfarbenverfälschungen, Richtungsinversonen und Im-Kopf-Lokalisation.

Auch die Benutzung von Sondenmikrofonen am Kunstkopf KU 80 weist diese Fehler auf, während ein genauere Abguß des Kopfes einer Testperson und eine bessere Nachbildung der Ohrimpedanz bei der Anwendung von Sondenmikrofonen diese Fehler offensichtlich weitgehend beseitigen können.

Gleichartige Mängel zeigen sich dagegen sofort wieder, wenn die Entzerrung des Kopfhörers überbrückt und die typspeziesiellen linearen Verzerrungen nicht berücksichtigt werden.

Daraus ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

- Der z. Z. verbreitete Kunstkopf (KU 80) muß verbessert werden.
- Kopfhörer müssen stets einen typspeziesiellen Entzerrer besitzen.
- Die Bedingungen für das Gesamtsystem müssen nach Berücksichtigung weiterer Randbedingungen international standardisiert werden, wenn es zu regulärem Betrieb und internationalem Programmaustausch von Kunstkopfsendungen kommen soll.

Hierzu müssen auf der Aufnahme- und Wiedergabeseite eine Reihe von Problemen gelöst werden.

4.1. Probleme auf der Aufnahmeseite

Gemäß den inzwischen vorliegenden Erkenntnissen sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Die akustischen Eigenschaften der Gehörgänge einschließlich der akustischen Impedanz der Trommelfellbezugsebene müssen beim Kunstkopf genau nachgebildet werden.
- Die akustische Ankopplung des Mikrofons an das System Ohrmuschel - Gehörgang - Trommelfell des Kunstkopfes muß rückwirkungsfrei erfolgen.

Beim KU 80 nach [9] wurde festgestellt, daß die akustischen Impedanzen in bestimmten Bezugssebenen der Kunstkopf-Gehörkanäle

in verschiedenen Frequenzbereichen relativ stark gegenüber natürlichen Bedingungen abweichen [8] [10]. Damit entstehen je nach Frequenzbereich, Schalleinfallrichtung und -entfernung Verfälschungen der Ohrsignale.

Eine optimale Nachbildung vereinbarter mittlerer Verhältnisse war bisher noch nicht erreichbar. Die bisher bekanntgewordenen Untersuchungsergebnisse über die einzelnen Übertragungsfaktoren, insbesondere auch über die akustische Trommelfellimpedanz, weichen teilweise noch sehr voneinander ab. Offensichtlich sind die Meßmethoden noch nicht ausreichend genau. Eine bestmögliche Ohrnachbildung ist aber als Bezugsbasis sowohl für die Verbesserung des Kunstkopfes als auch zum Vergleich bzw. zur Kalibrierung von Kopfhörern erforderlich.

Die zweite Bedingung kann mit geeigneten Sondenmikrofonen in der Bezugsebene relativ einfach realisiert werden, da hierbei die akustische Impedanz in der Bezugsebene bei Ankopplung unverändert bleibt. Der im allgemeinen geringe Störspannungsabstand von Sondenmikrofonen verhindert allerdings ihren Einsatz im Studiobetrieb.

Prinzipiell ist jedoch auch der Fall der Trommelfell-Bezugsebene denkbar, wie er bei dem verbreiteten Kunstkopf KU 80 offensichtlich nur unvollkommen realisiert werden konnte. Hierbei wird die akustische Impedanz in der Trommelfellebene unter Einbeziehung der speziellen akustischen Impedanz des verwendeten Mikrofones gebildet.

In allen Fällen sind die elektrischen Mikrofonausgangssignale so zu entzerren, daß sie hinsichtlich Amplituden- und Phasenfrequenzgang mit den Ohrsignalen der definierten Bezugsebenen im Kunstkopf-Gehörgang übereinstimmen (Mikrofonentzerrer im Bild 1).

Bei Einhaltung der genannten Bedingungen sind diese auftretenden linearen Verzerrungen richtungs- und entfernungsunabhängig, so daß mit Entzerrerverstärkern eine Kompensation möglich ist. Wie weit die Genauigkeit der Entzerrung getrieben werden muß (insbesondere bezüglich der Laufzeitverzerrungen), ist noch nicht ausreichend bekannt; es ist aber verständlich, daß die Toleranzen der gesamten Übertragungskette berücksichtigt werden müssen.

Ob mit Erfüllung der genannten Bedingungen eine wirklich korrekte Nachbildung eines mittleren Kopfes erreicht werden kann, erfordert noch eine statistisch gesicherte Aussage. Es ist nicht auszuschließen, daß zur Optimierung alle Schalleitungen des menschlichen Kopfes einschließlich der Knochenleitungen nachzubilden sind (z. B. Eustachische Röhre [11]).

4.1.1. Neuere Entwicklungen von Kopfnachbildungen

Die von Laws und Platte erreichten Ergebnisse mit einem speziellen Abschluß des Ohrkanals auf der Basis der Untersuchungen von Marton und Jones [12] veranschaulicht Bild 4 [8]. Hierbei wurde das Verhältnis des an einem Kunstkopf mit Sondenmikrofonen an der Bezugsebene gemessenen Schalldrucks zu dem am natürlichen Kopf auftretenden Schalldruck ermittelt,

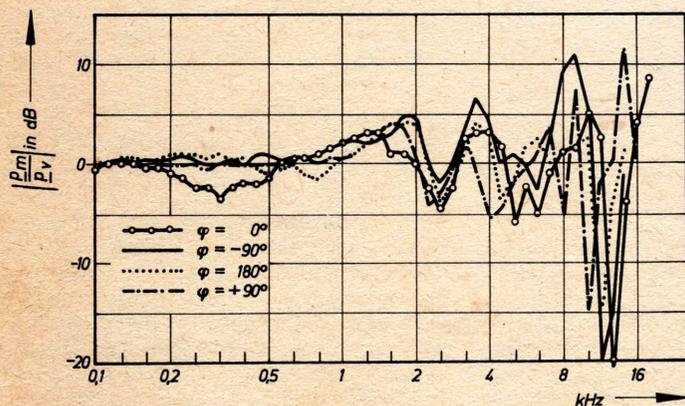


Bild 4: Schalldruckverhältnis $|P_m/P_v|$ als Funktion von Frequenz und Schalleinfallrichtung φ bei einem Kunstkopf von Laws und Platte (nach [8])
 P_m = Schalldruck am Kunstkopf,
 P_v = Schalldruckmittelwert von sechs Testpersonen

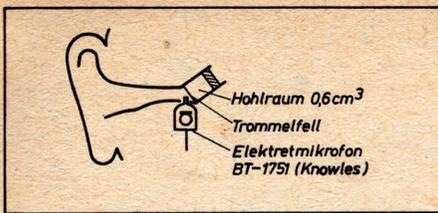


Bild 5: Anordnung des Mikrofons in dem Ohr des künstlichen Kopfes ORL-K von Novák und Sedláček (nach [13])

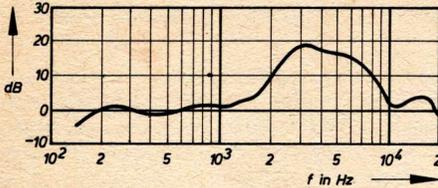


Bild 6: Kopfnachbildung nach Novák und Sedláček [13]. Übertragungsmaß freies Schallfeld-Trommelfell für Azimutwinkel 0°

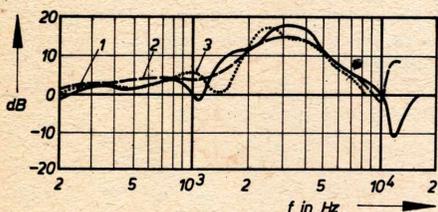


Bild 7: Übertragungsfunktion freies Schallfeld-Trommelfell für Azimutwinkel 0° (nach [18]) Messungen von 1 - Mehrgardt und Mellert (1977); 2 - Wiener (1946); 3 - Shaw (1974)

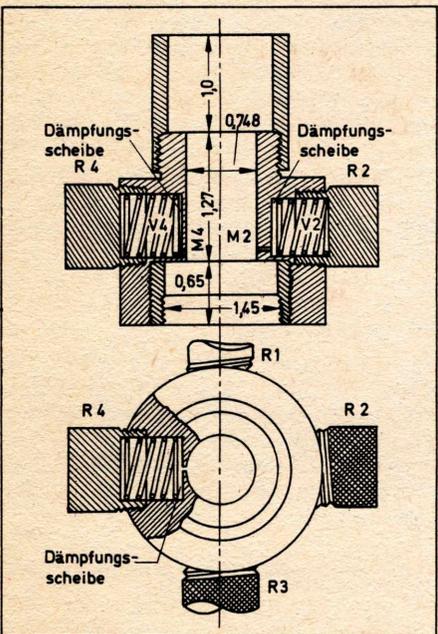


Bild 8: Zwislöcki-Kuppler (Maße in cm) nach [17]

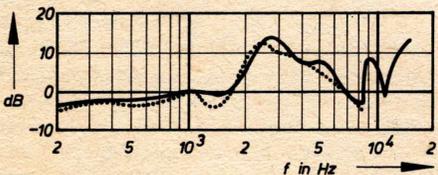


Bild 9: Kopfnachbildung Kemar. Übertragungsfunktion freies Schallfeld-Trommelfell für Azimutwinkel 0° (nach [14]), verglichen mit Shaw, 1974 (punktierte Linie)

und die Beträge wurden über der Frequenz aufgetragen.

Dieses Schalldruckverhältnis gibt direkt an, inwieweit die Freifeld-Übertragungsfunktionen des neuen Kunstkopfes von denen des natürlichen Kopfes abweichen. Der Idealfall läge vor, wenn das Verhältnis im gesamten Frequenzbereich den Wert 1 (± 0 dB) hätte. Als Schallquelle wurde ein Lautsprecher mit 3 m Abstand in den vier Hauptrichtungen benutzt. Die Messungen wurden mit sechs Testpersonen vorgenommen.

Man erkennt, daß die Approximation der Ohrkanalabschlußimpedanz im unteren und mittleren Frequenzbereich bereits recht gut erreicht ist und eine elektrische Entzerrung der Werte bis 4 kHz möglich ist. Darüber hinaus sind die Kurvenverläufe noch ungenügend und nicht durch einfache Entzerrer kompensierbar, da z. B. im Bereich 8 bis 16 kHz die Entzerrung immer nur für eine Richtung befriedigend realisiert werden könnte (die Kurven sind nicht deckungsgleich). Man ersieht aber aus diesem Bild recht gut, wo z. Z. noch Verbesserungen erreicht werden müssen.

Eine Kopfnachbildung von Novák und Sedláček [13] vermeidet einige Mängel des KU 80 dadurch, daß mit hoher Genauigkeit das ganze äußere Ohr mit Silikonkautschuk nachgebildet wurde. Der Schalltrichter wurde durch eine Membrane abgeschlossen, die das Trommelfell ersetzt. Die Impedanz des inneren Ohres wurde durch einen 0,6 cm³ großen nachgiebigen Hohlraum hinter der Membrane gebildet (s. Bild 5). Das Schalldrucksignal wurde mit Elektret-Subminiaturmikrofonen (Typ Knowles BT-1751) aufgenommen, die einen Schalleingangsdurchmesser von 0,7 mm besitzen und direkt vor dem Trommelfell installiert worden waren. Die Kurve für Schalleinfall unter 0° zeigt Bild 6. Das erreichte Übertragungsmaß entspricht etwa den Ergebnissen, die an natürlichen Köpfen gemessen wurden (Bild 7).

Die Kopfnachbildung Kemar von Burkhard und Sachs [14], die zur Entwicklung von Hörhilfen mit Richtmikrofonen konstruiert wurde, erfüllt die eingangs genannten Bedingungen in recht guter Näherung. Auf der Basis umfangreicher Messungen wurden die durchschnittlichen anthropometrischen Maße des Kopfes und Oberkörpers von Erwachsenen, einschließlich Außenohr und Gehörkanal, mit hoher Genauigkeit nachgebildet. Der Kunstkopf Kemar mit Torso liegt dabei gut innerhalb der von verschiedenen Autoren angegebenen Übertragungsmaße (freies Schallfeld-Ohrengang-Ohrkanal-Trommelfell). Die Autoren bezogen sich dabei aber vor allem auf Messungen von Shaw [15].

Zur Simulation des Ohrkanals wurde dabei ein neuer Kuppler verwendet, wie er 1970 von Zwislöcki [16] [17] entwickelt wurde und sich inzwischen sehr gut zur Messung von Kopf- und Einsteckhörern bewährt hat. An diesen Kuppler (Bild 8) wird anstelle des Trommelfells ein 1/2-Zoll-Kondensatormikrofon angesetzt, das auf linearen Frequenzgang entzerrt wurde. Der Vorteil des Zwislöcki-Kupplers liegt in der Möglichkeit, die mittlere akustische Trommelfellimpedanz nachzubilden zu können.

Zum Abgleich der Impedanz besitzt der Kuppler vier verschiedene abgestimmte Helmholtz-Resonatoren R₁ bis R₄. Bei Kemar ist es gelungen, den Abgleich sowie

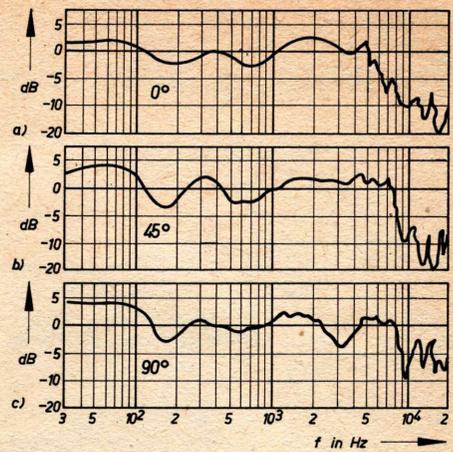


Bild 10: Kunstkopf nach Weber und Mellert [19]. Frequenzgang für vordere Schalleinfallrichtungen (0°, 45°, 90°)

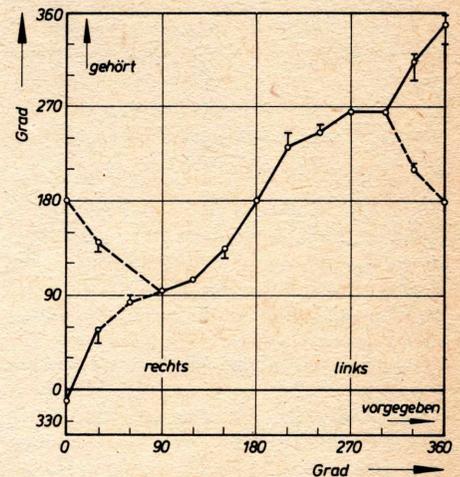


Bild 11: Kunstkopf nach Weber und Mellert [19]. Statistische Auswertung subjektiver Tests unter Berücksichtigung der Richtungsinverson (gestrichelt)

die übrige Nachbildung so weit zu treiben, daß eine gute Näherung zu den Messungen von Shaw [15] erreicht wurde.

Bild 9 zeigt die Übertragungsfunktion Freies Schallfeld - Trommelfell unter 0°. Sie ist auch mit den übrigen, im Bild 7 dargestellten Messungen vergleichbar, ebenso wie mit hier nicht wiedergegebenen Werten für andere Schalleinfallswinkel. Alle Kurven haben übrigens den typischen Verlauf, der durch den Einfluß des Kopfes auf das freie Schallfeld durch Beugung sowie durch Resonanzen im Ohr entsteht.

Auf der Basis neuerer Messungen [18] wurde von Weber und Mellert [19] eine verbesserte Kopfnachbildung entwickelt. Hierbei wurde ein anderes Konzept zugrundegelegt und versucht, die Ohrkanalresonanz und andere Strukturen der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion, die von der Richtung der Schallquelle unabhängig sind, zu glätten, um einen geradlinigen Frequenzgang zu erreichen. (Auf diese typischen Strukturen wurde bei Bild 9 bzw. Bild 7 hingewiesen.)

Die Autoren gingen davon aus, daß eine komplizierte Entzerrung im Gesamtweg vermeidbar sein müßte, zumal die komplexen nachgebildeten Übertragungskurven in der Rundfunk- und Meßpraxis bezüglich der über Kopfhörer wiedergegebenen Klangfarbe als beeinträchtigt empfunden werden. Bei der Glättung durch eine geeignete

Mikrofonanordnung und andere Maßnahmen wurde Wert darauf gelegt, die wichtigen Richtungsinformationen in dem Kunstkopfsignal zu erhalten. Die Impedanz der Anordnung wurde so gewählt, daß die natürliche, richtungsabhängige Ankopplung des freien Schallfeldes an das Ohr nicht zerstört wird [10].

Bild 10 zeigt den z. Z. erreichten Frequenzgang für vordere Schalleinfallrichtungen. Die geringen Schwankungen spiegeln stehende Wellen vor dem Kopf sowie Bodenreflexionen wider, da die Messungen nicht im reflexionsfreien Raum gemacht wurden.

Verwendet wurden Kondensatormikrofone. Die statistische Auswertung subjektiver Tests zeigt Bild 11.

Die Richtung vorn wird von 17% der Testpersonen richtig erkannt. Ein Vergleich mit Untersuchungen beim natürlichen Hören, bei denen mindestens 50% der Personen einen Vorn-Eindruck erhalten, zeigt, daß die Form des Kunstkopfes noch nicht optimal ist. Das schlechtere seitliche Auflösungsvermögen ist darauf zurückzuführen, daß die Ohrmuscheln noch nicht optimal und auch asymmetrisch gestaltet sind. Die vordere Richtung von 30° bildet der Kopf

allerdings für 50% der Testpersonen korrekt ab.

Ein Kunstkopf dieser Art wird seit einiger Zeit für Schallplattenproduktionen eingesetzt (Delta-Acoustic). Da er eine wesentliche Verbesserung in der Güte der spektralen Übertragung und Verbesserungen in der Richtungsabbildung aufweist, wird ihm große Natürlichkeit des Klangbildes und damit auch der Richtungswiedergabe zugeschrieben. Auf eine spezielle Entzerrung dieses Kunstkopfes wird im Abschn. 5. (Entzerrung für 30°) eingegangen.

Wird fortgesetzt