

Möglichkeiten und Grenzen der kopfbezogenen Stereophonie

Dipl.-Ing. GERHARD STEINKE

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

Teil 2 und Schluß

4.2. Probleme auf der Wiedergabeseite

Zur korrekten Wiedergabe der aufgenommenen und entzerrten Ohrsignale muß dafür gesorgt werden, daß in der Bezugsebene wieder das Signal $p_r(t)$ bzw. $p_l(t)$ reproduziert wird (s. Bild 1). Das wäre analog zum Sondenmikrofon mit einem speziellen Einsteckhörer denkbar, ist aber aus Qualitätsgründen kaum zu realisieren. Es ist deshalb notwendig, den Kopfhörer für die Bezugsebene zu entzerren.

Für den Übertragungsfaktor kann das komplexe Verhältnis

$$A_{KBE}(f) = \frac{p_{-BE}(f)}{u_K(f)}$$

angegeben werden [10]. Dabei ist

$p_{-BE}(f)$ die Fouriertransformierte des Schalldrucksignals $P_{BE}(t)$, das bei Beschallung durch den jeweiligen Kopfhörer in der definierten Bezugsebene des Gehörganges auftritt;

$u_K(f)$ die Fouriertransformierte des Signals $u_K(t)$, das in das jeweilige Kopfhörersystem eingespeist wird.

Die Kopfhörereantzerrung muß demzufolge durch ein Filter $1/A_{KBE}(f)$ erfolgen.

Die z. Z. verfügbaren Kopfhörer weichen wegen fehlender internationaler Standardisierung noch stark voneinander ab. Jeder Kopfhörertyp benötigt daher eine spezielle Entzerrung. Auf diese wird aber gegenwärtig allgemein verzichtet, so daß bereits aus diesem Grunde die Hörer von Kunstkopfsendungen auch unterschiedliche Hörereignisse empfinden müssen.

Für die Kalibrierung der Kopfhörer ist allerdings auch keine einheitliche, definierte Meßanordnung verfügbar; die Freifeldmessung oder der IEC-Ohrkuppler („künstliches Ohr“) haben sich als nicht eindeutig erwiesen. Der bei der Kopfnachbildung von Burkhard und Sachs [14] erwähnte Zwislocki-Kuppler [16] [17] bringt offenbar eine wesentliche Verbesserung, ist aber aus verständlichen Gründen noch nicht international standardisiert. Entsprechend der o. a. Definition kommt eigentlich nur eine Messung an einer Kopfnachbildung mit (Sonden-)Mikrofon an der Bezugsebene, ähnlich Kemar, in Betracht.

Erforderlich ist also ein Bezugs-Kunstkopf. Danach könnte auch eine Kopfhörer-Bezugs-Übertragungskurve festgelegt werden, auf die die Hersteller von Kopfhörern ihre Erzeugnisse beziehen sollten.

Die mittlere Übertragungsfunktion eines offenen Kopfhörers nach Betrag und Phase, gemessen am Gehöreingang, zeigt Bild 12 nach [20]. Es ist zu erkennen, welche Filterung der Schall bei der Kopfhörerwiedergabe erfährt.

5. Möglichkeiten zur Verbesserung des Gesamtsystems

Sofern es für die allgemeine Praxis gelingt, bezogen auf eine zweckmäßig gewählte

Bezugsebene und auf einen Bezugs-Kunstkopf, die erforderlichen Entzerrungsmaßnahmen auf der Aufnahme- und Wiedergabeseite zu realisieren, werden sich in vielen Fällen dem Idealfall nahe kommende Ergebnisse erreichen lassen. Die Größe der dabei noch auftretenden Toleranzen ist jedoch z. Z. nicht überschaubar.

Die größten Abweichungen können auftreten, wenn der nachgebildete Kopf sehr stark vom jeweiligen natürlichen Kopf abweicht und dadurch Laufzeit- bzw. Amplitudenfehler in den Ohrsignalen des Hörers auftreten, die wiederum Lokalisations- und Klangfarbenfehler hervorrufen können. In diesem Fall hört ja der Hörer gewisse Maßstäbe mit einem fremden Kopf, weshalb die angestrebte Ortung der Schallquellen entsprechend dem eigenen Gehör nicht realisierbar ist. Im ungünstigsten Fall würden dann wieder die gegenwärtigen Verhältnisse bei Verwendung des Kunstkopfes nach [9] und fehlender kopfhörertypischer Entzerrung eintreten.

Zusätzlich können auch durch die Abweichung der Eigenschaften des Ohres des aufnehmenden Tonmeisters bzw. Toningenieurs von denen des jeweiligen Hörers weitere störende Erscheinungen auftreten, wenn vom Aufnahmepersonal technische Manipulationen oder Kompensations-schaltungen angewendet werden, um bestimmte Effekte zu erzielen, die aber beim Hörer durch ebensolche Abweichungen nicht in der gewünschten Weise empfunden werden können. Man muß daher durchaus weitere vorgeschlagene zusätzliche Maßnahmen in Betracht ziehen, die die Lokalisation verbessern helfen.

5.1. Realisierung von Kopfbewegungen

Auf die Bedeutung der Kopfbewegung zur Erhöhung der Ortungsschärfe als natürliche Hörgewohnheit des Menschen war bereits hingewiesen worden. Da die Richtung der höchsten Empfindlichkeit des Gehörs um $\pm 70^\circ$ (nicht etwa bei 0°) liegt, ist das also in jedem Fall wünschenswert, insbesondere zur Erhöhung der Genauigkeit der Vorne-Ortung. Mit dem Kunstkopf ist das nicht realisierbar.

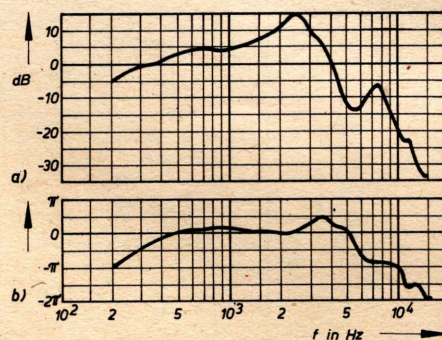


Bild 12: Mittlere Übertragungsfunktion Kopfhörer-Gehöreingang nach Betrag (a) und Phase (b) für viele Versuchspersonen (nach Mehrgard in [20])

Eine geeignete Maßnahme auf der Wiedergabeseite wurde inzwischen in [21] vorgestellt und erprobt. Hierbei werden durch elektrische bzw. mechanische Steuergrößen, die aus der Kopfdrehung abgeleitet werden, die Übertragungseigenschaften der Wiedergabeeinrichtung so gesteuert, daß die mit einer Steuerung funktional verknüpften Änderungen der Ohrsignale mit denjenigen Änderungen übereinstimmen, die die Ohrsignale bei entsprechenden Kopfbewegungen während des normalen Hörvorganges bzw. während einer raumbezogenen Lautsprecherwiedergabe erfahren würden. Das kann z. B. bis zu einem bestimmten Grade durch Dämpfungs- und Laufzeitglieder vor den Kopfhörersystemen geschehen, deren Dämpfung bzw. Laufzeiten als Funktion der Kopfdrehung nachge-regelt werden.

5.2. Entzerrungsmaßnahmen auf der Aufnahme- und Wiedergabeseite

Entsprechend Bild 1 und den Erläuterungen in den Abschnitten 4.1. und 4.2. kann ein entzerrtes Stereosignal A/B übertragen werden, das noch eine kopfhörertypische Entzerrung erfordert.

Da es z. Z. keine Festlegungen für einen Bezugs-Kopfhörer gibt und die korrekte Entzerrung einen gewissen Aufwand erfordert, wäre es auch denkbar, die Übertragungskurve eines guten, weit verbreiteten Kopfhörers zugrunde zu legen und die erforderliche optimale Entzerrung auf die Aufnahme-seite zu verlegen, wo ein evtl. höherer Aufwand für die geringe Stückzahl in den Aufnahmestudios gerechtfertigt ist. Übertragen würde dann ein Stereosignal A'/B'.

Dagegensprechen würde aber, daß dennoch für viele Kopfhörer Entzerrungen für die von der gewählten Bezugskurve abweichenden Typen erforderlich sind (wenn auch vielleicht mit geringem Aufwand realisierbar).

Gewichtiges Gegenargument dürfte aber sein, daß eine einheitliche Übertragungskurve auf der Wiedergabeseite wünschenswert ist, damit auch für alle übrigen Fälle der Kopfhörerwiedergabe weitgehend ähnliche Hörereignisse erzielbar sind.

5.3. Entzerrung des Kopfhörers für raumbezogene Übertragungen

Bekanntlich tritt bei der Kopfhörerwiedergabe von raumbezogenen Informationen, also z. B. der üblichen Stereoübertragung, Im-Kopf-Lokalisation (IKL) auf. Zur Behebung werden verschiedene Wege angegeben.

In [22] wird eine exakte Freifeldentzerrung vorgeschlagen, d. h., die wirksame Übertragungsfunktion des entzerrten Kopfhörers sollte gleich der bei Schalleinfall von vorn wirksamen Freifeld-Außenohr-Übertragungsfunktion $A_{FF(0^\circ)}(f)$ sein. Beim Abhören von monofonen Programmen treten

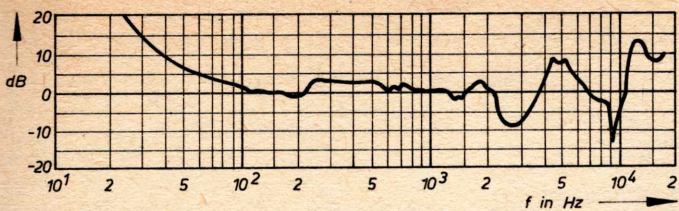
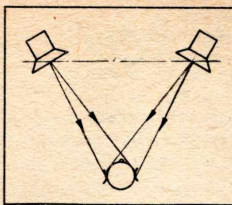


Bild 13: Übertragungsfunktion eines Freifeldentzerrers für den Kopfhörer HD 414 (nach [22])

Bild 14 (rechts): Störkomponenten bei Beschallung mit zwei Lautsprechern in üblicher Stereo-Wiedergabeanordnung



dann Hörereignisse auf, die denen beim Abhören über einen (idealen, im reflexionsfreien Raum stehenden) Lautsprecher genau entsprechen. Die kopfhörtypische Klangfarbe und IKL von Hörereignissen werden damit vermieden.

Beim Abhören von üblichen Stereoprogrammen gibt es entsprechende Änderungen innerhalb der Medianebene, d. h. Verschiebungen einzelner Hörereignisanteile, was bereits vorteilhafter gegenüber der bisherigen Praxis sein kann. Diese Freifeldentzerrung unter 0° müßte im Falle der Kunstkopfübertragungen auf der Sendeseite wieder aufgehoben werden, bedingt dort also eine zusätzliche Filterung

$$1/\underline{A}_{FF(0^\circ)}(f)$$

Dieses Filter müßte nach dem Mikrofontentzerrer im Bild 1 eingefügt werden. Übertragen wird dann ein Stereosignal A"/B".

Die Entzerrungen auf der Wiedergabeseite

$$\underline{A}_{FF(0^\circ)}(f)$$

$$1/\underline{A}_{KBE}(f)$$

könnten dann in einem Filter vereinigt werden.

Die in diesem Fall für einen speziellen Kopfhörertyp (HD 414, Sennheiser) erforderliche Entzerrung ist im Bild 13 dargestellt:

$$\underline{A}_{EKBE}(f) = \frac{\underline{A}_{FE(0^\circ)}(f)}{\underline{A}_{KBE}(f)}$$

In [20] wird gegenüber der in [22] propagierten Freifeldentzerrung des Kopfhörers für 0° eine Entzerrung von 30° vorgeschlagen, um eine größtmögliche Kompatibilität mit raumbezogener stereofoner Lautsprecherwiedergabe zu gewährleisten. Unter Beachtung des Gesamtsystems wird empfohlen, daß für 30° (der Winkel, unter dem üblicherweise die Wiedergabelautsprecher angeordnet sind) auch der Kunstkopf auf einen linearen Frequenzgang entzerrt werden sollte, wobei relativ zu dieser Richtung die spezielle Richtcharakteristik des Kunstkopfes erhalten bleiben muß.

Unter dieser Voraussetzung würde sich die Kunstkopfaufnahme spektral nur geringfügig von den üblichen raumbezogenen (Intensitäts-)Stereoaufzeichnungen unterscheiden, d. h., die Verfahren könnten als kompatibel angesehen werden. Ein solcher Kunstkopf wurde im Abschn. 4.1. erwähnt.

Eine derartige Überlegung ist von Nutzen, wenn die Kunstkopfübertragung über Lautsprecher wiedergegeben werden soll (s. Abschn. 6.).

Andere Vorschläge gehen davon aus, für die Wiedergabe raumbezogener Aufnahmen über Kopfhörer die bei Lautsprecherwiedergabe herrschenden Verhältnisse zu simulieren. Dazu sind die Störkomponenten

nachzubilden, die dadurch entstehen, daß das Signal des linken (bzw. rechten) Lautsprechers nur das linke (bzw. rechte) Ohr, sondern jeweils auch das andere Ohr – wenn auch im Pegel verringert, verzögert und klanggefärbt – erreicht (Bild 14). Bei der raumbezogenen Übertragung bilden diese Störkomponenten eine wichtige Voraussetzung für den sog. Summenlokalisierungseffekt. Zur Nachbildung benötigt man ein spezielles Entzerrungsnetzwerk [23], das bewirkt, daß der elektroakustische Übertragungsfaktor zwischen der elektrischen Spannung an jeweils einem Eingang des Netzwerkes und dem Schalldruck am Trommelfell des Hörers demjenigen gleich ist, der sich bei einer vorgegebenen Lautsprecheranordnung in einem Abhörraum zwischen der elektrischen Spannung an jeweils einem Lautsprechereingang und dem Schalldruck am Trommelfell des gleichen Hörers ergeben würde.

Bei der schaltungstechnischen Realisierung, die insbesondere die erwähnten Störkomponenten zur Vermeidung der IKL und die Klangfärbung, die bei Lautsprecherwiedergabe durch den Einfluß des Raumes entsteht, simulieren muß, müßten strenggenommen auch die speziellen Übertragungsfaktoren der äußeren Ohren des jeweiligen Hörers individuell berücksichtigt werden. Nach Untersuchungen in [23] soll jedoch der Mittelwert aus einer großen Anzahl von Versuchspersonen ausreichend sein.

Bisher vorgestellte Entzerrungsnetzwerke stellten sich jedoch als noch unbefriedigend heraus. Eine neuere Schaltung, die die Mängel früherer Realisierungen vermeiden soll, wurde in [24] veröffentlicht. Der Autor selbst hält eine optimale Lösung für unerreichbar, da der Einfluß des Raumes bei praktischer Lautsprecherbeschallung kaum nachzubilden ist. In Abhängigkeit von den Eigenschaften des abgehörten Programmes empfiehlt er Dosierung des nachgebildeten akustischen Übersprechens durch Einstellregler, aber auch sinnvolle Weiterentwicklung (z. B. in Verbindung mit Nachhalleinrichtungen).

Experimentelle Arbeitsergebnisse von Mitarbeitern des Rundfunks der DDR liefern ähnliche Aussagen. Insbesondere unterliegt der Grad der Außer-Kopf-Lokalisation stark einer Programm- bzw. Genreabhängigkeit bei konstanter Störkomponenten-Nachbildung, die durch geeigneten Zusatz von Diffussignalen für einige, aber nicht für alle Hörereignisrichtungen verbessert werden kann.

6. Probleme der Wiedergabe kopfbezogener Stereoübertragungen über Lautsprecher (Kompatibilität)

In der normalen Anordnung der Lautsprecher für übliche Stereowiedergabe wirken

Kunstkopfübertragungen unbefriedigend, auch bei einer für die jeweiligen Anlagen geltenden (d. h. eine auch den Abstand Hörer – Lautsprecher berücksichtigende) Klangfarbenentzerrung; man empfindet ein Auseinanderfallen der Schallereignisse. Dieser Effekt entsteht durch die bereits erläuterten, bei Lautsprecherwiedergabe auftretenden Störkomponenten.

Durch geeignete Kompensationschaltungen kann man die bei Wiedergabe von Kunstkopfsignalen unerwünschte Störkomponente am jeweils abgewandten Ohr auslöschen. Diese Schaltungen lassen sich durch Ermittlung des akustischen Übersprechens bei der Lautsprecherwiedergabe konzipieren. Den Verlauf dieses, auf Grund der Beugungserscheinung u. a. des Kopfes, auftretenden akustischen Übersprechens zeigt Bild 15.

In [20] ist eine Schaltung angegeben, die die Beugung, Laufzeitdifferenzen, Abschattungseffekte usw. berücksichtigt. Aber auch derartige Schaltungen haben sich in der Praxis nicht genügend bewährt. Eine Erklärung dafür kann darin gesucht werden, daß diese Schaltungen zweifellos im reflexionsfreien Raum recht gut funktionieren; optimal im Schnittpunkt der Lautsprecherachsen. Im normalen Wohnraum kann der diffuse Schall durch Raumreflexionen die Kompensationswirkung verfälschen. Insbesondere ist die Darstellung kürzerer Entfernungen als der Lautsprecherabstand nicht möglich; die Wiedergabe kann halliger wirken. Schallereignisse, die im Rücken des Hörers lokalisiert werden sollen, werden nur recht ungenau geortet.

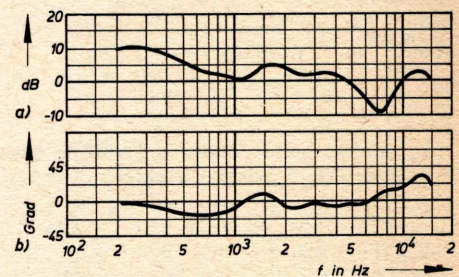


Bild 15: Akustisches Übersprechen am mittleren menschlichen Kopf nach Betrag (oben) und Phase (unten); Verhältnis des Schalldruckes am abgewandten Ohr für Schalleinfall unter +36°, Laufzeit eliminiert (nach Messungen von Mehrgardt in [20])

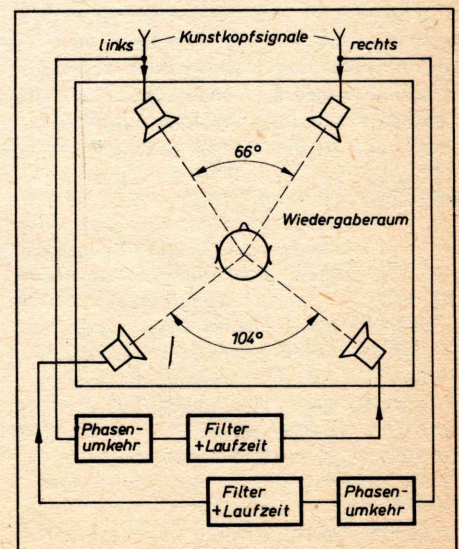


Bild 16: Lautsprecherwiedergabe von Kunstkopfsignalen (nach [25])

Um die starke Raumabhängigkeit einer derartigen Anordnung zu vermeiden, entwickelten Kürer, Plenge und Wilkens [25] eine Schaltung für vier Lautsprecher. Bild 16 zeigt das Prinzip.

Subjektive Tests zeigen, daß die Näherung schon recht brauchbar ist in bezug auf Richtungsverteilung und Räumlichkeitsdarstellung. Problematisch ist die Klangfärbung infolge der brillanzärmeren Aufnahme (verglichen mit einer raumbezogenen Stereoaufnahme, die für eine optimale Lautsprecheranordnung hinsichtlich der Klangfarbe entzerrt wurde) und infolge des Einflusses des Wiedergaberaumes. Beeindruckend ist aber dennoch die erreichbare Ortung, z. B. „oben“ bei der Wiedergabe eines den Hörer überfliegenden Flugzeuges, oder die Einbeziehung des Hörers in eine öffentliche Musikveranstaltung.

Man muß sich fragen, ob eine solche Kompatibilität (über Lautsprecher) überhaupt angestrebt werden sollte. Offensichtlich liegt ein Beweggrund dafür darin, daß die bisherige Lautsprechergewohnheit und gewisse Nachteile das Kopfhörertragen nach geraumer Zeit als lästig empfinden lassen; ein wichtigerer Grund ist aber darin zu sehen, daß alle Verfahrenswege zu prüfen sind, um evtl. zu einer echten Alternative zur aufwendigen Vierkanaltechnik (Quadrofonie) zu kommen.

In dieser Hinsicht sind diese Versuche nützlich, aber wegen der außerordentlichen Platzabhängigkeit wird sich eine Kompensationsschaltung kaum in der Praxis durchsetzen können. Die auftretenden Probleme sollten dennoch weiterhin aufmerksam studiert werden, um wichtige Erkenntnisse vorteilhaft bei der Weiterentwicklung der Aufnahme- und Wiedergabetechnologie (sowohl für kopfbezogene als auch raumbezogene Stereophonie) nutzen zu können.

7. Technische und ästhetische Probleme der Aufnahmetechnik bei Kunstkopfstereophonie

Das wesentliche Merkmal von Kunstkopfaufnahmen, die Originalähnlichkeit, ist von beachtlichem Nutzen und Reiz; bei der Reproduktion von Musik allgemein ist die Abbildung des Originals für die heutige Hörerwartung allerdings nicht in allen Fällen erwünscht. Die „Nachteile“ der Originalähnlichkeit fallen bei Musikübertragungen besonders auf – es sei jedoch vorweggenommen, daß sie dem Kunstkopffverfahren an sich nicht angelastet werden können.

Hinsichtlich der Lautstärkebalance der Instrumente und Instrumentengruppen untereinander ist die Kunstkopftechnik kaum besser als eine Aufnahme mit einem einzigen Stereomikrofon. Das ist auch zu erwarten, denn weder am Platz des Dirigenten nach an guten Plätzen im Konzertsaal kann für alle Werke gleichermaßen ein lautstärkemäßig völlig ausgeglichenes Klangbild entstehen; feine Nuancen werden auf Grund des Aufnahmeabstandes vom Raum verdeckt. Dazu kommen die verschiedenen Interpretationen, die örtlichen akustischen Bedingungen usw. Die Suche nach dem geeigneten Aufstellungspunkt für den Kunstkopf erfordert einige Mühe, zumal man ja nicht nur ein angemessenes musikalisches Gleichgewicht, sondern auch eine zweckmäßige Hallbalance bei guter Durchsichtigkeit erzielen will.

Ein weiterer Nachteil erscheint gravierend:

Bild 17: Hörrichtige Bearbeitung von Schalleignissen mittels eines Bearbeitungsschallfeldes (nach Bergner [26])

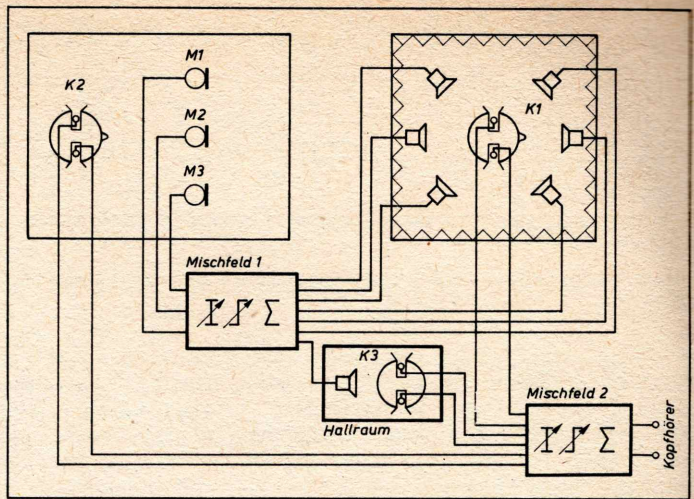
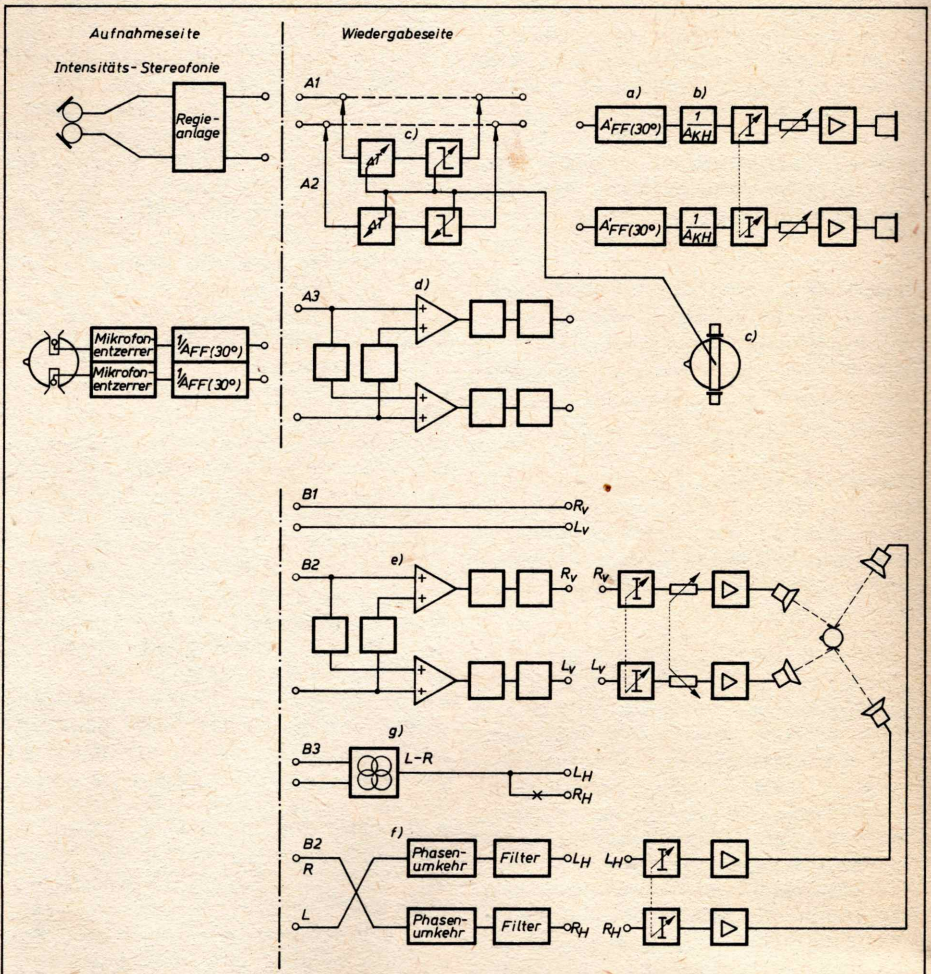


Bild 18: Zusatzeinrichtung für Heimwiedergabe von raumbezogenen und kopfbezogenen Stereoübertragungen



Hinsichtlich der Klangfarbe wirken Kunstkopfaufnahmen im Gebiet hoher Frequenzen beeinträchtigt, das wird auch bei optimaler Entzerrung zu erwarten sein. Diese Benachteiligung wird von Musikexperten in Diskussionen besonders beklagt, obwohl sie auf Grund der Richtcharakteristik des Kunstkopfes (sie wirkt sich wie ein größerer Mikrofonabstand aus und läßt somit einen größeren Raumeinfluß empfinden) schließlich erwartet werden muß.

Der Verlust an Klangfarbenbrillanz – idealer Kunstkopf und korrekte Entzerrungen vorausgesetzt – ist „normal“, eben originaltreu. Für eine Übertragung ist das aber nur bedingt akzeptabel, da ja nur noch der akustische Sinnesreiz existiert. Der indirekte Eindruck entspricht einem größeren R/D-Verhältnis; im Konzertsaal

sind wir es gewohnt, hier müssen wir uns erst daran erinnern. Wahrscheinlich ist das der Preis für das bessere Abbild der Realität. Das Einfügen von speziellen Entzerrern (Präsenzfiltern, die damit auch die Vorn-Ortung verbessern) kann den Klang brillanter machen, kann aber auch den Raumschall und somit die Realität verfälschen.

Für Verbesserungen der Aufnahmetechnologien gibt es vorzugsweise folgende Zielsetzungen:

- Überwindung von Problemen bei der Kunstkopfaufnahme durch Einsatz mehrerer Kunstköpfe, zusätzlicher Stützmikrofone, ferner zusätzlicher Klangfarben- und Richtungsbeeinflussungen u. ä., Entwicklung weiterer Bearbeitungsmöglichkeiten usw.

Im Verlaufe des Beitrages wurde bereits mehrfach erwähnt, daß in den Fällen, in denen es nicht auf eine hohe Originaltreue ankommt, aber auch wegen der Einschränkung, daß mit der Einmikrofontechnik (\cong ein Kunstkopf) nur unter bestimmten akustischen Bedingungen und unter der Voraussetzung eines ausgeglichenen Klangbildes befriedigende Ergebnisse erzielt werden können, Praktiken der üblichen Polymikrofonie Anwendung finden sollten. Es ist daher zu untersuchen, welche Verbesserungen durch weitere Kunstköpfe bzw. Stützmikrofone, zugemischt über Klangfarbenfilter und mit angemessener Zeitverzögerung, erreichbar sind. Die Zeitverzögerung dient dann sowohl zur Entfernungsstaffelung als auch zur Richtungsübereinstimmung. Der Zusatz von künstlichem Nachhall wird wie üblich erforderlich werden; der Einsatz eines Kunstkopfes im Hallraum muß dabei so erfolgen, daß nicht der Hallraum abgebildet wird (also nicht etwa der Halligkeitseindruck eines kleinen Raumes entsteht). Auch hierbei wird der Einsatz von Verzögerungsgeräten notwendig werden.

Für viele Fälle benötigt man daher Stützmikrofone bzw. Stütz-Kunstköpfe, insbesondere zur Aufnahme und Bearbeitung bestimmter Einzelschallquellen, was nicht nur ähnlichen oder sogar höheren Aufwand wie in der üblichen Stereo-Aufnahmetechnologie (Verzögerung, Filterung, Pegeldosierung, Zusatz spezieller Verhallung usw.), sondern hier auch die spezielle laufzeitgerechte Einordnung der zusätzlichen Quellen bedingt, damit diese nicht etwa im Hinterkopf bzw. zu nah geortet werden.

Wie viele Kunstkopfaufnahmen zeigen, ist der richtungsgeregelte Zusatz von Einzelquellen bzw. die Synchronisation richtungsbeeinflusster Kunstkopfaufnahmen möglich. Eine detaillierte Beschreibung für eine geeignete Zumischung von Stützmikrofonen wird in [22] gegeben.

Das Aufnahmepersonal in den Funkhäusern des Rundfunks der DDR hat inzwischen vielfältige, der künstlerischen Zielstellung entsprechende Aufnahmetechnologien entwickelt, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

Die bisherigen Erfahrungen mit der noch unvollkommenen Kunstkopftechnik haben aber u. a. gezeigt:

- Der Einsatz von Kompandern zur Störabstandsverbesserung ist unumgänglich.
- Die Bandmontage ist schwieriger und zeitaufwendiger.
- Die Kunstkopftechnik ist erst als Anfang einer neuen Entwicklung anzusehen; es ist wichtig, weiter mit der Einbeziehung des Raumes zu experimentieren.
- Die Übertragung in kopfbezogener Technik erfordert wesentlich strengere Maßstäbe bezüglich der inhaltlichen Werte des Programms, da die Dominanz des Klangreizes wegfällt.
- Auf Grund der bestehenden Unvollkommenheiten sind Manipulationen weiterhin erforderlich, sie sind jedoch stark programmabhängig. Das hat zur Folge, daß die Erarbeitung einheitlicher und allgemein anwendbarer Technologien erschwert wird.

- Erforschung der Genres und Aufnahmebedingungen, die besonders wirkungsvoll von der Kunstkopfübertragung erfüllt werden können

Wie die Erfahrungen mit den zweijährigen Experimentalsendungen im Rundfunk der DDR zeigen, eignen sich für kopfbezogene Stereofonie besonders

- Hörspiele, Hörbilder, Tonkompositionen
- Programmbeiträge aus dem journalistischen Bereich, vorzugsweise mit hohen Originaltonanteilen (Feature u. ä.)
- Konzertübertragungen aus akustisch guten Konzertsälen, bei denen der Hörer in das Originalgeschehen mit einbezogen werden soll
- Übertragungen von öffentlichen Unterhaltungssendungen, bei denen ein ausgewogenes Verhältnis der akustischen Atmosphäre im Veranstaltungsraum und des Direktschalles vermittelt werden soll
- Musikproduktionen von solchen Werken, die inhaltlich und gestalterisch ansprechen und speziell für kopfbezogene Übertragung bearbeitet werden; anderenfalls unterscheiden sie sich wenig von der raumbezogenen Produktion. Das bedeutet auch, daß die verschiedenen möglichen Abbildungsebenen - IKL, Nahfeld, Fernfeld - musikalisch sinnvoll ausgeschöpft werden (sowohl der musikalisch-klangliche Aspekt als auch der akustisch-soziale Publikumskontakt müssen berücksichtigt werden [7])
- komplexe Schallfeldstrukturen, deren raumbezogene Übertragung an den Grenzen und Möglichkeiten der gegenwärtigen Übertragungstechnik scheitert.

Da spontanes Musizieren nur im geschlossenen Ensemble möglich ist, was trotz aller erreichten Perfektion bei einer Synchronisations-Vielkanaltechnik fehlt, schließt die Kunstkopftechnik für bestimmte Genres (Dixiland z. B.) auch eine Lücke der Übertragungstechnologie.

Viele der bisher bekanntgewordenen Hörspiele enthalten beeindruckende Szenen (Szenen im Freien, in Auditorien, Ballonfahrt, Gerichtssaalszenen usw.), die, wie in einer Diskussion gesagt wurde, „dezentere und diskretere Kommunikation ermöglichen, das Hörvergnügen steigern sowie Hörerfahrungen vermitteln, die sonst nicht möglich sind“. Wie die Experimentalsendungen zeigen, gibt es auf dem lohnenden Gebiet der Reportage bereits wesentliche Erfahrungen.

- Anpassung vorhandener (raumbezogener) Stereoaufzeichnungen für Kopfhörerriedergabe

Es ist inzwischen üblich geworden, raumbezogene Musik-Stereoaufzeichnungen unter Zusammenmischung mit Kunstkopfaufnahmen zu bearbeiten und das auch mit gutem Erfolg. Das ist einmal möglich mit einem Entzerrungsnetzwerk (z. B. nach [23] [24]), vor allem, weil hier unter Studiobedingungen der höchste Aufwand für eine derartige Entzerrungstechnik getrieben werden kann und der Hörer somit nicht belastet wird. Zum anderen kann man über Lautsprecher den Kunstkopf beschallen, um eine Kunstkopfaufnahme zu entwickeln. Blauert wies bei Begründung eines solchen Netzwerkes schon 1972 darauf hin [23]. Allerdings besteht hierbei immer die Gefahr einer stärkeren Klangfärbung durch die verwendeten Lautsprecher, auch wenn man störende Raumeinflüsse ausschaltet. Bergner [26] entwickelte den Gedanken weiter und benutzt ein spezielles Bearbei-

tungs-Schallfeld, um es auch in der Kunstkopf-Aufnahmetechnik zu ermöglichen, die einzelnen Schallereignisse mit üblichen studioteknischen Mitteln zu bearbeiten und eine Synthese der üblichen raumbezogenen Aufnahmetechnik und der kopfbezogenen Technik für bestimmte Genres (z. B. Tanzmusik) zu gewinnen.

Dazu werden entsprechend Bild 17 die Signale der Mikrofone M_1 , M_2 usw. (mit oder ohne Zwischenspeicherung auf einem Vielspurgerät) in üblicher studioteknischer Weise bearbeitet (Klang- und Dynamikbeeinflussung, Verzögerung, Verhallung usw.), und in der gewünschten Abbildungsrichtung wird über eine Lautsprecheranordnung in einem reflexionsarmen Raum ein Kunstkopf K_1 beschallt.

In einem zweiten Mischfeld werden die erhaltenen Signale (nach evtl. weiterer Zwischenspeicherung) wieder als Kunstkopfsignale behandelt und ggf. zusätzlich bearbeitet (Filterung usw.) und durch evtl. Zumischen von Signalen aus Nachhallrichtungen (z. B. Hallraum mit Kunstkopf K_2), insbesondere aber auch durch die Signale des Kunstkopfes K_2 im Aufnahme-raum ergänzt. Letzterer liefert eine evtl. erforderliche Raum- bzw. Geräuschatmosphäre (Beifall u. a.).

Durch diese Bearbeitungsstufen können die bei üblichen Mehrkanalaufnahmen erhaltenen Informationen sowohl für raumbezogene als auch kopfbezogene Stereoaufzeichnungen genutzt werden, unabhängig von den im Aufnahme-raum vorhandenen wirklichen Richtungs- und Rauminformationen. Bei Verwendung eines Bearbeitungs-Schallfeldes läßt sich die erforderliche Außer-Kopf-Lokalisation (AKL) erreichen, und in bestimmten Grenzen können auch die Klangfarben- und Richtungsfehler des verwendeten Kunstkopfes KU 80 ausgeglichen werden.

- Herstellung dreidimensionaler Hörereignisse, wie nunmehr bei kopfbezogener Stereofonie erreichbar, auch für raumbezogene Stereofonie durch Bearbeitung der Signale einer üblichen Polymikrofonanordnung

Diese Zielsetzung wäre zweifellos für Rundfunk und Schallplatte die wichtigste, wahrscheinlich müssen aber vorher mehrere Zwischenstufen durchlaufen werden.

Neben der eigenständigen Kunstkopfübertragung für spezielle Genres sollte das Ziel von Rundfunk und Schallplatte weiter darin bestehen, die gegenwärtige Aufnahmetechnologie derart weiterzuentwickeln, daß die Aufnahmen entweder über Lautsprecher oder nach entsprechenden Zusatzmaßnahmen entsprechend Abschn. 6. auch über Kopfhörer Hörereignisse vermitteln, die als dreidimensional empfunden werden können, wobei der Hörer auch bestimmte, in vertretbaren Grenzen zu dosierende Manipulierungsmöglichkeiten erhalten sollte.

Verschiedene Autoren haben aber inzwischen die Aufgabe gestellt, die Aufnahmetechnik derart weiterzuentwickeln, daß die Sendung unabhängig von ihrer Entstehungsart - d. h., gleichgültig, ob raumbezogene oder kopfbezogene Aufnahmetechnik - wahlweise mit Kopfhörern oder Lautsprechern zufriedenstellend wiedergegeben werden kann, ohne daß der Hörer zusätzliche Maßnahmen ergreifen muß (s. a. [27]).

Mitarbeiter des Rundfunks der DDR verfolgten diese Zielstellung bereits seit längerem und haben Aufnahme- und Bearbeitungsanordnungen entwickelt, die für bestimmte Genres eine derartige Kompatibilität in akzeptablen Grenzen erreichen läßt, unter Beibehaltung der entscheidenden Parameter Klangfarbe und Außer-Kopf-Lokalisation.

Für optimale Anforderungen reichen aber die bisherigen Ergebnisse noch nicht aus, sie sind daher keinesfalls als abgeschlossen anzusehen.

8. Überlegungen für Zusatzeinrichtungen der Heimempfangsanlage des Hörers zur wahlweisen Wiedergabe mit Kopfhörern bzw. Lautsprechern

Zur Anpassung des Kopfhörers muß der Rundfunkempfänger eine entsprechende frequenzlineare Einstellung gewährleisten (z. B. an einem speziellen Kopfhörerausgang). Die Lautstärke soll keinesfalls höher als die des Originalen gewählt werden. An den Störabstand der angeschlossenen Geräte werden dennoch sehr hohe Anforderungen gestellt, da der Umgebungslärm fast völlig unterdrückt werden kann und die sonst bei Lautsprecherwiedergabe auftretenden Verdeckungen wegfallen. Unter derartigen Umständen müßte der Störabstand sogar 70...80 dB betragen!

Da die Einrichtungen der Übertragungskette jedoch z. Z. solche Werte nicht erreichen können, wird Kopfhörerwiedergabe, insbesondere bei Aufnahmen mit Kunstkopf, in dieser Beziehung erheblich unbefriedigender empfunden. Die Industrie sollte zumindest auf der Wiedergabeseite – neben der Entwicklung der erwähnten Netzwerke und hochqualitativer Kopfhörer – geeignete Maßnahmen einleiten.

Von Bedeutung beim Abhören kopfbezogener Aufnahmen (über Kopfhörer) ist insbesondere die Tatsache, daß die Nutzsignale dreidimensional außerhalb des Kopfes und die übertragungstechnisch bedingten Störsignale innerhalb des Kopfes geortet werden, so daß eine Verdeckung nur bei ausreichend großem Störabstand zum geringsten Nutzsignal erreichbar ist.

Im folgenden wird eine Zusatzeinrichtung skizziert, die die verschiedensten Varianten der Wiedergabe realisiert (s. Bild 18) [28]. Das Beispiel soll die noch vorhandene Spannweite der Lösungen demonstrieren, wenn jeder Übertragungsfall optimiert wird.

A) Wiedergabe über Kopfhörer

A1) Wiedergabe von kopfbezogenen Stereoübertragungen in äquivalenter Lautstärke und unter optimalen Störabstandsbedingungen mit optimal entzerrten Kopfhörern

A2) wie A1), jedoch unter Berücksichtigung der Kopfdrehungen des Hörers in bezug auf das Hörereignis

A3) Wiedergabe von (üblichen) raumbezogenen Stereoübertragungen ohne IKL und Klangfärbung.

Dazu ist erforderlich:

- a) Filter zur Realisierung der Freifeldentzerrung $A_{FF}^{(30^\circ)}$
- b) Filter zur typgerechten Entzerrung des Kopfhörers $1/A_{KH}$
- c) Einrichtung zur Steuerung der Eigenschaften der Ohrsignale bei Kopfdrehung des Hörers

d) Filter zur Wiedergabe raumbezogener Übertragungen über Kopfhörer (nach [23] [24])

B) Wiedergabe über Lautsprecher

B1) Wiedergabe üblicher raumbezogener Stereoübertragungen über Lautsprecher

B2) Wiedergabe von kopfbezogenen Stereoübertragungen über zwei bzw. vier Lautsprecher

B3) Abstrahlung von pseudoquadrofonen Signalen über zwei zusätzliche (hintere) Lautsprecher.

Dazu ist erforderlich:

e) Filter zur Wiedergabe kopfbezogener Übertragungen über zwei Lautsprecher, z. B. nach [20]

f) Filter zur Wiedergabe kopfbezogener Übertragungen über vier Lautsprecher nach [25] (wegen der Unvollkommenheiten der Wiedergabe über zwei Lautsprecher ist der Fall f) zu bevorzugen)

g) Einrichtung zur Differenzbildung eines Stereosignals zur Erzeugung eines pseudoquadrofonen Hörereignisses über zwei zusätzliche (hintere) Lautsprecher, wie sie ohnehin für den Fall B2) (d. h. Realisierung f) benötigt werden.

C) Kombinierte Wiedergabe

Mit den Mitteln beider Wiedergabeformen lassen sich weitere Kombinationen realisieren:

C1) Wiedergabe kopfbezogener Stereoübertragung über zwei vordere Lautsprecher und der Kompensations-signale nach [25] über offene Kopfhörer

C2) Wiedergabe raumbezogener Stereoübertragung über zwei Lautsprecher und von pseudoquadrofonen (Raum- u. ä.) Signalen über offene Kopfhörer statt über zwei zusätzliche (hintere) Lautsprecher

C3) In der Übergangszeit, solange der unzureichende Kunstkopf KU 80 verwendet werden muß, parallele Wiedergabe von kopfbezogenen Signalen sowohl über Kopfhörer als auch Lautsprecher. Diese schon vor längerer Zeit vorgeschlagene Maßnahme weist allerdings auch Nachteile durch Verdeckungserscheinungen auf, wie leicht abzuleiten ist. Auf diese Methode soll hier nicht näher eingegangen werden.

9. Schlußbemerkungen

Die bisherigen Experimentalsendungen und die geschilderten Überlegungen bestätigen die Auffassung [29], daß Kunstkopfstereofonie keine Alternative zur Stereofonie (Bifonie oder Quadrofonie) mit Lautsprechern, sondern ein eigenständiges Übertragungsverfahren für spezielle Aufgaben darstellt, die nur dieses Medium erfolgreich bewältigen kann.

Die o. a. Verfahren ineinander überzuführen ist problematisch, aber unter bestimmten Aspekten (Abschn. 7.1. bis 7.4.) sinnvoll, vielleicht sogar notwendig. Weitere wissenschaftliche Untersuchungen dieser Übertragungsform sind daher berechtigt bzw. erforderlich.

Dabei ist es durchaus möglich, daß sich die Zielstellung ähnlich wie bei der raumbezogenen Stereofonie entwickelt, wo die prin-

zipbedingten Eigenheiten bzw. Einschränkungen des Verfahrens zu einer speziellen Aufnahme- und Bearbeitungstechnologie führten, die eigentlich alle technischen Manipulationen legitimiert, wenn nur der Hörer das Endprodukt als der optimalen Hörerwartung für die jeweilige Form der Reproduktion entsprechend akzeptiert [2]. Sicher müssen wir in manchen Fällen auf die optimale Originalähnlichkeit bei der kopfbezogenen Übertragung verzichten und entwickeln hierfür eine Aufnahmetechnologie, die lediglich die Imagination einer solchen Originalähnlichkeit erzeugen kann; möglicherweise wird aber damit die gewünschte künstlerische Wirkung viel stärker als mit anderen Mitteln vermittelt. Das bedeutet auch bewußten Verzicht auf bestimmte Genres, für die sich eine kopfbezogene Übertragung künstlerisch und technisch nicht eindeutig und wirkungsvoll genug beherrschen läßt.

Die Besonderheiten der menschlichen Individualität und die unterschiedliche Ausbildung der Nervensysteme bedeuten, daß jeder Mensch seine Umwelt anders erlebt. Ob daher mit der Kunstkopfstereofonie überhaupt eine optimale Originalähnlichkeit mit einfachen Mitteln beim Hörer erreichbar sein wird oder nur mit aufwendiger Individualentzerrung, sei noch dahingestellt.

Berücksichtigt man weiterhin die bereits von Békésy festgestellte Fähigkeit der willentlichen Beeinflussung des Höreindrucks bzw. den von Hoeg vermuteten individuellen Lernprozeß des Menschen, der trotz der nicht unerheblichen Störungen der Gehör-eigenschaften zu ähnlichen Hörereignissen führt, so gibt es offenbar noch viele zu analysierende Faktoren, die bei den erörterten Übertragungsfehlern eine Rolle spielen.

Aus dem vorher Gesagten konnte deutlich werden, daß die Kunstkopfstereofonie eine für den Rundfunk spezifisch relevante Übertragungsform darstellt, die es weiter zu vervollkommen lohnt.

Literatur

- [1] Warncke, H.: Die Grundlagen der raumbezogenen stereophonen Übertragung im Tonfilm. Akustische Zeitschrift 6 (1941) H. 3, S. 174–188
- [2] Steinke, G.: Zur Frage der Kompatibilität zwischen kopfbezogener und raumbezogener Stereofonie. Technische Mitteilungen des RFZ 19 (1975) H. 4, S. 89–95
- [3] Blauert, J.: Vergleich unterschiedlicher Systeme zur originalgetreuen elektroakustischen Übertragung. Rundfunktechnische Mitteilungen 18 (1974) H. 4, S. 222–227
- [4] Keibs, L.: Stereo-Ambiofonie in Zweikanaltechnik. Nachrichtentechnik 15 (1965) H. 7, S. 246 bis 253
- [5] Steinke, G.: Stereo-Ambiofonie, die Grundlage der Quadrofonie. radio fernsehen elektronik 21 (1972) H. 11, S. 345–348; H. 12, S. 403–405; H. 13, S. 439–441
- [6] Steinke, G.: Zur Entwicklung der Quadrofonie. Technische Mitteilungen des RFZ 16 (1972), H. 2, S. 59–64
- [7] Hoeg, W.; Steinke, G.: Stereofonie – Grundlagen. Berlin: VEB Verlag Technik 1975
- [8] Laws, P.; Platte, H.-J.: Ein spezielles Konzept zur Realisierung eines Kunstkopfes für die kopfbezogene stereofone Aufnahmetechnik. NTG-Fachberichte 56 (1977), Hörrundfunk 4, S. 192–198
- [9] Kürer, R.; Plenge, G.; Wilkens, H.: Verfahren zur hörrichtigen Aufnahme und Wiedergabe von Schallereignissen und Vorrichtung zu seiner Durchführung. Offenlegungsschrift Nr. 1 927 401, 1970 (BRD)

Fortsetzung auf Seite 466

- [10] Laws, P.; Blauert, J.; Platte, J.: Anmerkungen zur stereofonen kopfbezogenen Übertragungstechnik. *Acustica* 36 (1976 77), S. 45–47
- [11] Haase, J.; Hiemann, K.: Einrichtung zur Aufnahme von Schallsignalen unter Verwendung eines Kunstkopfes. *Offenlegungsschrift* 2437373, 1976 (BRD)
- [12] Morton, J. Y.; Jones, R. A.: The acoustical impedance presented by some human ears to hearing aid earphone of the insert type. *Acustica* 6 (1956), S. 339
- [13] Novak, M.; Sedlacek, K.: Ein Kunstkopf für Stereophonie. Vortrag zur 14. Akustischen Konferenz der ČSSR. Tatraska Lomnica 1976
- [14] Burkhard, M. D.; Sachs, R. M.: Anthropometric manikin for acoustic research. *Journ. Acoust. Soc. Am* 58 (1975) H. 1, S. 214–222
- [15] Shaw, E. A. G.: *Journ. Acoust. Soc. Am* 56 (1974) S. 1848–1861
- [16] Zwislocki, J. J.: An acoustic coupler for earphone calibration. *Laboratory of Sensory Communication, Syracuse University, New York, LSC-S-7*, 1970
- [17] Velt, J.: Neuer Kuppler zum Messen von Kopf- und Einsteckhörern. *Funktechnik* 32 (1977) H. 5, S. 116–118
- [18] Mehrgardt, S.; Mellert, V.: Transformation characteristics of the external human ear. *Journ. Acoust. Soc. Am* 61 (1977) H. 6, S. 1567 bis 1576
- [19] Weber, R.; Mellert, V.: Ein Kunstkopf mit „ebenen“ Frequenzgang. Vortrag zu „DAGA 78“ (VDE-Verlag)
- [20] Mellert, V.: Die Normung kopfbezogener Stereo-Aufnahmen und ihre Wiedergabe über Lautsprecher. *Fernseh- und Kinotechnik* 30 (1976) H. 3, S. 86–88
- [21] Boerger, G.; Blauert, J.; Laws, P.: Verfahren und Anordnung zur Vermeidung der bei Kopfhörerwiedergabe durch Kopfdrehungen hervorgerufenen Hörereignisortänderungen. *Offenlegungsschrift* 2 331 619, 1975 (BRD)
- [22] Platte, J. J.; Laws, P.: Technische Probleme beim Einsatz kopfbezogener stereofoner Übertragungsverfahren. *NTG-Fachberichte* 56 (1977), *Hörrundfunk* 4, S. 184–191
- [23] Blauert, J.; Laws, P.: Verfahren zur ort- und klanggetreuen Simulation von Lautsprecherbeschallungen mit Hilfe von Kopfhörern. *Acustica* 29 (1973) H. 5, S. 273–277
- [24] Thomas, M. V.: Improving the stereo headphone sound image. *Journ. Aud. Eng. Soc.* 25 (1977) H. 7/8, S. 474–478
- [25] Kürer, R.; Plenge, G.; Wilkens, H.: Wiedergabe von Kunstkopfsignalen über Lautsprecher. *radio mentor electronic* 39 (1973) H. 11, S. 512 bis 514
- [26] Bergner, E.: Verfahren und Anordnung zur hörrechtlichen Bearbeitung von Schallereignissen. *WP 119 687*, 1976 (DDR)
- [27] Blauert, J. u. a.: Wissenschaftliche Grundlagen der kopfbezogenen Stereophonie. *Rundfunktechnische Mitteilungen* 22 (1978) H. 4, S. 195–218
- [28] Steinke, G.: Überlegungen zur Verbesserung des Kunstkopf-Übertragungsverfahrens. Mitteilung zur 2. Arbeitstagung der Tonregisseure und Toningenieure der DDR-R, 1976
- [29] Steinke, G.: Quadrofonie oder kopfbezogene Stereophonie? *radio fernsehen elektronik* 23 (1974) H. 1, S. 5–7