

Grundlagen der HiFi-Technik XLVII

Kunstkopfstereophonie

2. Einsatzmöglichkeiten in Studio- und Meßtechnik

Der erste Beitrag zum Thema „Kunstkopfstereophonie“ galt dem Prinzip und den Realisierungsmöglichkeiten eines Kunstkopfaufnahmesystems. Daß diese Technik mittlerweile einen professionellen Standard erreicht hat, steht außer Frage. Wichtig sind aber auch die Fragen nach den Anwendungsmöglichkeiten. Eine Originalschallsituation aufzuzeichnen und originalgetreu wiederzugeben ist bei Verwendung eines Kunstkopfaufnahmesystems und geeignet entzerrter Kopfhörer problemlos.

Doch gerade im Tonstudiobereich stellt sich oft das Problem, daß die Akustik des Aufnahme-raums nicht zufriedenstellend ist, Solisten zu leise sind und durch Stützmikrofone verstärkt werden sollten, oder aber auch direkt im Studio mit mehreren Mikrofonen die unterschiedlichen Schallquellen auf Mehrspurtonbandgeräten aufzuzeichnen, zu mischen und Hall künstlich je nach Bedarf hinzuzufügen. Daraus ergibt sich vermehrt der Wunsch, auch Kunstkopfaufnahmen entsprechend zu bearbeiten.

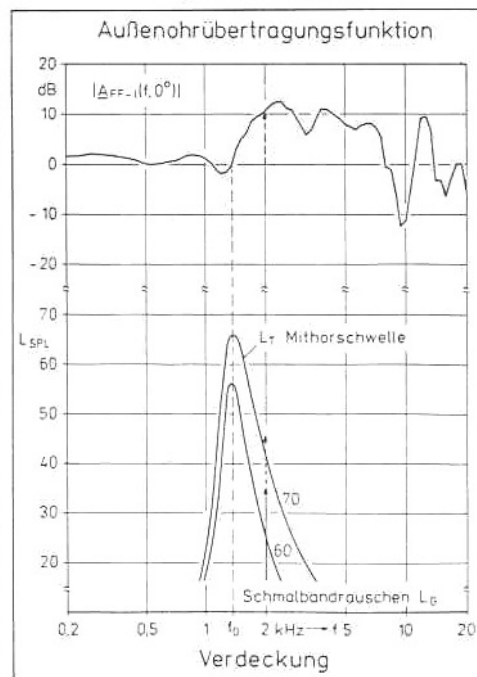
Im Zuge eines verstärkten Umweltbewußtseins gewinnen jedoch die Kunstköpfe auch im Bereich der Meßtechnik immer mehr an Bedeutung. Herkömmliche Meßverfahren, zum Beispiel der A-bewertete Schalldruckpegel, versagen bei komplexen Geräuschen. Hier müssen Messungen unter Berücksichtigung der Psychoakustik durchgeführt werden, denn die Analyse von Geräuschen durch das menschliche Gehör ist weitaus komplexer als bislang in der Meßtechnik be-

rücksichtigt, so daß der Kunstkopf zur späteren Signalanalyse das einzig geeignete Aufnahmefunktion darstellt. Mit seiner Hilfe ist es möglich, Geräuschsituationen zu archivieren, gehörrechtlich zu analysieren und Unterschiede zwischen verschiedenen Geräuschen zu dokumentieren.

In der Meßtechnik ergibt sich häufig das Problem, daß Geräusche subjektiv als ausgesprochen lästig empfunden werden, dieses aber zum Beispiel durch den A-bewerteten Schalldruckpegel nicht bestätigt werden kann. Wird ein Geräusch nach der herkömmlichen Meßmethode analysiert, so wird das Signal zeitlich und frequenzmäßig gemittelt, gehörrechtlich gefiltert (die A-Bewertungskurve entspricht der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Ohres, die ihr Maximum bei Frequenzen zwischen 2 und 5 kHz aufweist und zu hohen und tiefen Frequenzen hin abfällt) und als Meßwert zur Anzeige gebracht. Diese Meßmethode wird aber der Analyse durch das menschliche Gehör nicht gerecht. Bis ins letzte erforscht sind die Signalverarbeitungsprozesse, die im menschlichen Gehör stattfinden, noch nicht. Einige Effekte, die zur Diskrepanz zwischen subjektivem Höreindruck und objektivem Meßwert führen, lassen sich jedoch beschreiben.

Zunächst erfolgt die Analyse eines einfallenden Schalles in Frequenzgruppen /1/, die annähernd logarithmisch aufgeteilt sind. Wird nun eine dieser Frequenzgruppen angeregt – beispielsweise durch ein Schmalbandrauschen –, so ergibt sich auch in den nebenliegenden Frequenzbereichen, wo das Schmalbandrauschen keine Frequenzanteile mehr aufweist, eine reduzierte Empfindlichkeit des Ohres entsprechend den in Bild 1 markierten Bereichen.

Ein Sinuston beispielsweise, dessen Pegel sich unterhalb des markierten Bereiches befindet, wird vom Zuhörer nicht wahrgenommen. Dieser Effekt wird als Simultanverdeckung /1/ bezeichnet. Der Pegel des Sinustons hängt aber von der Schalleinfallrichtung ab und wird wesentlich durch die Filterung mit der Außenohr-Übertragungsfunktion /2/ bestimmt. Somit hängt letztlich wiederum die



Wahrnehmbarkeitsschwelle vom menschlichen Außenohr ab, was eine Schallaufzeichnung mit Hilfe eines Kunstkopfaufnahmesystems voraussetzt.

Ein weiteres Problem ist die Analyse von zeitlichen Strukturen in komplexen Geräuschen. So kann beispielsweise das Geräusch eines tropfenden Wasserhahns sehr lästig wirken, obwohl die Leistung dieses Geräusches meßtechnisch, im Vergleich beispielsweise zu einem gleichförmigen Rauschen, vernachlässigbar ist. Hier zeigt sich, daß neben der frequenzmäßigen Verteilung die zeitliche Struktur für die Lästigkeit eines Geräusches eine wesentliche Rolle spielt. Effekte wie Vor- und Nachverdeckung sind hier unter anderem von Bedeutung.

Das Zusammenwirken von allen Signalverarbeitungsmechanismen des menschlichen Gehörs ist aber zur Zeit noch nicht hinreichend erforscht, um mit Hilfe einer entsprechenden Analyse ein Maß, beispielsweise für die Lästigkeit eines Geräusches, zu erhalten. Da aber der Mensch auch kein akustisches Langzeitgedächtnis hat, ist gerade

① Einfluß der Außenohrfilterung auf die Maskierung eines Sinustons durch Schmalbandrauschen (nach /2/):

Hat das Schmalbandrauschen einen Pegel von $L_G = 60$ dB, so kann ein Sinuston mit einer Frequenz von 2 kHz noch wahrgenommen werden. Wird der Pegel des Rauschens auf 70 dB erhöht, so würde der Sinuston bei einem Aufnahmefunktion mit konstantem Übertragungsmaß verdeckt. Wird der Sinuston mit der Außenohrübertragungsfunktion für Schalleinfall von vorne $A_{FF-1}(f,0)$ gefiltert, so wird der Pegel des Sinustons um den gestrichelt gezeichneten Betrag angehoben, liegt also oberhalb der durch das maskierende Rauschen bestimmten Schwelle und wird somit wieder hörbar.

Grundlagen der HiFi-Technik XLVII

bei der Beurteilung kleinster Unterschiede, beispielsweise bei Geräuschen, Musik oder auch Lautsprechern, der Kunstkopf eine entscheidende Hilfe.

Mit seiner Hilfe können die Geräusche aufgezeichnet und – solange noch kein objektives, dem menschlichen Gehör adäquates Analysesystem zu Verfügung steht – vergleichend beurteilt werden [3]. Kann man es direkt zwischen zwei aufgezeichneten Signalen vergleichen, so ist das menschliche Ohr ein außerordentlich empfindliches Meßinstrument, das selbst feinste Unterschiede noch wahrnimmt.

Auch eine weitere, meßtechnische Analyse von Kunstkopfsignalen ist möglich. Zwar existiert zur Zeit noch kein objektives Meßverfahren, das eine eindeutige Korrelation zwischen subjektivem Empfindungsvermögen (Lästigkeit, Rauheit, Schärfe) mit den objektiv beschreibbaren Signaleigenschaften (Zeitstruktur, spektrale Verteilung, Amplitudenmodulation) herstellt. Oft jedoch läßt sich durch geeignete Filterung der Kunstkopfsignale herausfinden, welche Komponenten eines Geräuschs besonders lästig wirken.

Dabei läßt sich möglicherweise schon durch das Herausfiltern eines kleinen Frequenzbereichs eine deutliche Verminderung der Lästigkeit erzielen, obwohl bei einer Messung des gefilterten Geräuschs mit herkömmlichen Meßmethoden dieser Frequenzbereich nicht als signifikant feststellbar gewesen wäre. Konstrukteuren wiederum erlaubt die Kenntnis des so gefundenen Frequenzbereichs meist einen Rückschluß auf das Bauteil, von dem die entsprechenden Frequenzanteile erzeugt werden.

Auf diese Weise können gezielt Modifikationen durchgeführt werden, die letztlich zu einer deutlichen Verbesserung des Geräuschkomforts führen (zum Beispiel im Automobilbau).

Im Tonstudiobereich lassen sich prinzipiell zwei verschiedene Aufnahmephilosophien unterscheiden. Entweder soll der Höreindruck, zum Beispiel bei einem Konzert, möglichst originalgetreu reproduziert werden (Bild 5), oder aber die Aufnahme soll sich zu einem eigenständigen künstlerischen Produkt entwickeln, wo letztendlich am Mischpult bestimmt wird, wie die Zusammensetzung der einzelnen Instrumente zum Gesamtklang erfolgt. **Eine möglichst originalgetreue Aufzeichnung bietet sich immer dann an, wenn live mitgeschnitten werden soll oder wenn gute Musiker in einem Raum mit guter Akustik spielen.** Die Aufgabe des Tonmeisters verlagert sich

⑤ Kunstkopfaufnahme (Kunstkopf von HEAD Acoustics)

dann vom technischen mehr auf den künstlerischen Bereich.

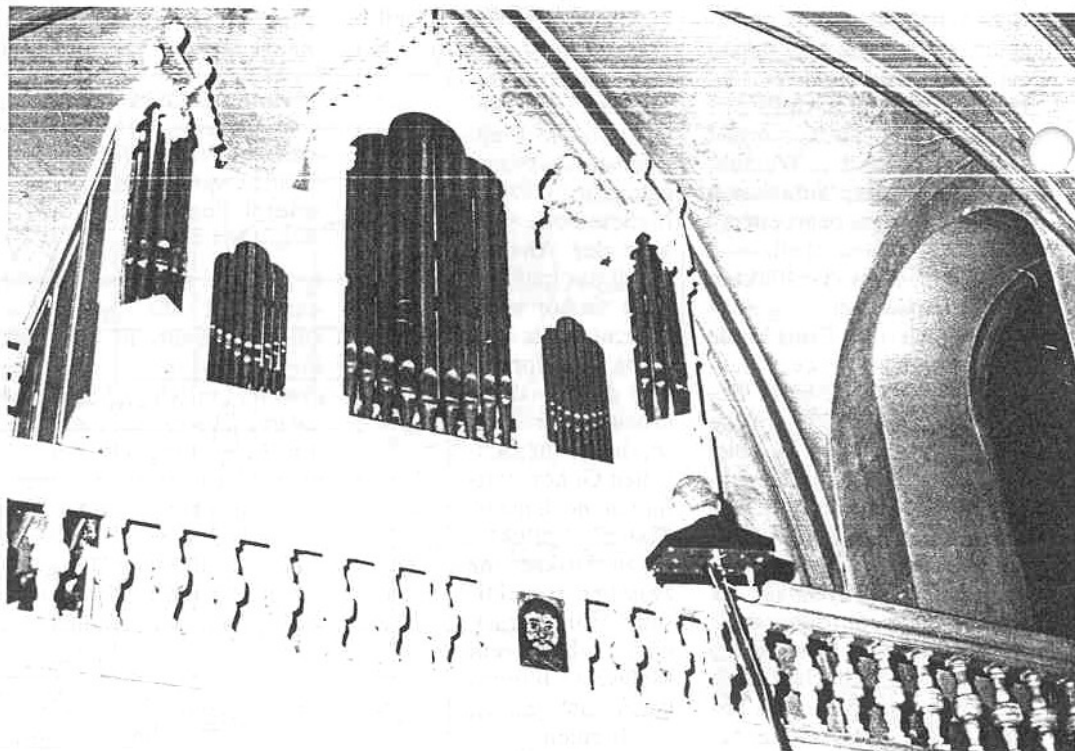
Im Bereich der U-Musik dagegen, wo das Original im oben beschriebenen Sinne gar nicht mehr existiert, wird fast ausschließlich in Multimikrofonietechnik aufgenommen. Soll in diesem Bereich der Kunstkopf Anwendung finden, so müssen besondere Hilfsmittel zur Verfügung stehen. Der Kunstkopf alleine ist zwar das ideale Aufzeichnungsmikrofon zur originalgetreuen Reproduktion von Schallereignissen, eine Manipulation oder gar eine Mischung verschiedener Schallquellen, wie bislang üblich, scheint jedoch schwierig. Das ist sicherlich auch ein Grund für die bislang geringe Akzeptanz der Kunstkopftechnik im Tonstudiobereich.

Dabei ist die Mischung verschiedener Kunstkopfaufnahmen eigentlich gar kein Problem. Zu beachten ist, daß die verschiedenen Aufnahmen im gleichen Raum erfolgen, und daß die Position des Kunstkopfes nicht verändert

wird. Die Mischung von Aufnahmen aus unterschiedlichen Räumen ist in aller Regel nicht sinnvoll. Ein Beispiel, daß die Ergebnisse dieser Aufnahmetechnik hervorragend sind, ist eine Jazz-Produktion, die insbesondere aufgrund ihrer „perfekten technischen Qualität für HiFi-Freunde ganz besonders interessant“ [4] ist.

Häufig tritt das Problem auf, daß Instrumente zu leise sind und durch Stützmikrofone verstärkt werden sollen (Bild 2). Dient als Hauptmikrofon ein Kunstkopf, so ist ein Stützmikrofon mit Nieren- oder Kugelcharakteristik nicht ohne weiteres einsetzbar. Wie in Bild 2 dargestellt, muß das Ausgangssignal eines derartigen Stützmikrofons zunächst mit der Außenohrübertragungsfunktion für die entsprechende Schalleinfallrichtung gefiltert werden. Nur so kann man sicherstellen, daß die Ohrsignale exakt den natürlichen entsprechen.

Weiterhin muß der Tonmeister den Laufzeitunterschied, der zwischen Kunstkopfauf-



nahmesystem und Stütz-
mikrofon besteht, ausgleichen.
Die Kompensation der Lauf-
zeit ist mit heutigen Mitteln
(digitale Verzögerungsgerä-
te) leicht realisierbar. Die Fil-
terung mit der Außenohr-
Übertragungsfunktion dage-
gen stellt ein Problem dar.

Prinzipiell läßt sich die
Außenohrübertragungsfunk-
tion für eine Schalleinfall-
richtung simulieren. So kann
ein Richtungsmischpult oder
Außenohrsimulator (15/, 16/
17/) jedes Signal, sei es vom
Synthesizer oder Mikrofon,
so filtern, daß die beiden Aus-
gangssignale des Außenohrsi-
mulators den Ohrsignalen
entsprechen, die im Ohrkanal
einer Versuchsperson im frei-
en Schallfeld aus der entspre-
chenden Einfallrichtung zu
messen gewesen wären.

Die Filterübertragungsfunk-
tionen für einen Außenohrsi-
mulator erhält man beispiele-
weise durch Messung der
Außenohr-Übertragungs-
funktion für die verschiede-
nen, zu simulierenden Schall-
einfallrichtungen am Kunst-

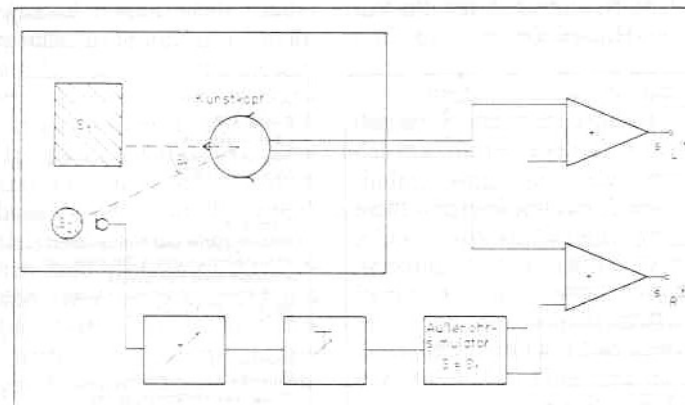
② Anwendung von Stütz- mikrofonen in der Kunstkop- f-aufnahmetechnik.

kopf oder an einer Referenz-
versuchsperson. Die so ge-
wonnenen Übertragungs-
funktionen lassen sich, zum
Beispiel mit Hilfe von analo-
gen Filtern, nachbilden. Die-
se Lösung ist außerordentlich
aufwendig, da für jede Schall-
einfallrichtung ein eigenes,
recht komplexes Filter reali-
siert werden muß.

Weitaus besser läßt sich die
Filterung mit Hilfe der digita-
len Signalverarbeitung durch-
führen. Ein Signalprozessor*,
der frei programmierbar ist,
kann die Filterung für jede ge-
wünschte Schalleinfallrich-
tung durchführen. Ein Wech-
sel ist dabei möglich, indem
der Signalprozessor ein ande-
res Programm abarbeitet, das
die Filterung für die ge-
wünschte Schalleinfallrich-

tung durchführt. Der Nach-
teil dieser Lösung ist, daß nur
die Schalleinfallrichtungen
simuliert werden können, de-
ren Übertragungsfunktionen
gemessen und abgespeichert
sind. Signalprozessoren mit
ausreichender Rechenkapazi-
tät sind seit kurzem verfü-
gbar, so daß diese Lösung erst
in jüngster Zeit realisiert wer-
den konnte.

Eine andere Möglichkeit der
Simulation von Außenohr-
Übertragungsfunktionen bie-
tet ein Modell, das 1984 an der
RWTH Aachen entwickelt
wurde 18/. Ausgehend von den
geometrischen Kenngrößen
der Referenzversuchsperson
- Schulter- und Kopfabmes-
sungen, Ohrmuschelgröße -,
kann es die Außenohr-Über-
tragungsfunktion für jede be-



liebige Schalleinfallrichtung
berechnen, und zwar auf-
grund der verschiedenen Beug-
ungen, Reflexionen und Fil-
terungen, die durch die aku-
stisch wirksamen Elemente
Kopf, Schulter, Oberkörper,
Ohrmuschel, Ohrkanal und
Trommelfell hervorgerufen
werden.

Sie läßt sich in einem verei-
nfachten Modell so gut be-
schreiben, daß eine Simula-
tion mit Hilfe einer geeigneten
elektroakustischen Ersatz-
schaltung möglich ist. Die
Vorteile dieser Methode sind,
die Außenohr-Übertragungs-
funktion für jede beliebige
Schalleinfallrichtung berech-
nen und individuelle Kenn-
größen wie Kopfgröße oder
Schulterabstand verändern zu
können 18/. Auch dieses Mo-

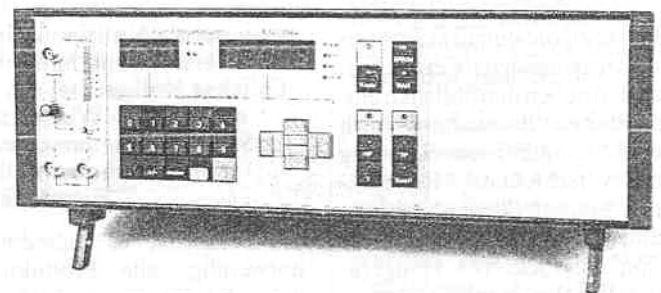
dell erlaubt die digitale Filte-
rung mit Hilfe von Signalpro-
zessoren. Ein Prototyp eines
derartigen Außenohrsimula-
tors, bei dem ein Teil der
Schaltung allerdings noch ana-
log realisiert wurde, ist in Bild
3 dargestellt.

Damit eröffnen sich völlig
neue Möglichkeiten in der
Aufnahmetechnik. Die Auf-
zeichnung verschiedener In-
strumente kann wie bisher in
Multimikrofonietechnik er-
folgen. Anstelle der bislang
gebräuchlichen Panorama-
regler, die das Signal auf die
gewünschte Position inner-
halb der Stereobasis positio-
nieren, werden die Bedie-
nelemente (Winkeleinstellung
Horizontal- und Medianebe-
ne) eines Außenohrsimula-
tors benötigt. Mit Hilfe der

Kopfhörer einen weitaus bes-
seren Klangeindruck erzielt
als eine mit herkömmlicher
Technik aufgezeichnete Pro-
duktion. Bei Kopfhörerwie-
dergabe kann das Klangbild
nun im gesamten Raum und
nicht nur zwischen zwei Laut-
sprechern erzeugt werden.

Dabei bekommen gerade Ef-
fekte wie Echo und Hall eine
zusätzliche Dimension. In na-
türlichen Räumen erhält man
Reflexionen aus den verschie-
densten Richtungen. Die frü-
hen Reflexionen geben dem
Gehör Informationen über
die Raumgröße und -form.
Die nachfolgenden, immer
dichter werdenden Reflexio-
nen, die als Hall wahrgenom-
men werden und keine Rich-
tungsinformation mehr bie-
ten, werden von den Dämp-
fungseigenschaften der ver-
schiedenen Wände im Raum
bestimmt.

Hochwertige elektronische
Hallgeräte, wie sie heute im
Studiobereich Verwendung
finden, können viele Parame-
ter des Halls, wie frühe Refle-
xionen, Echodichte und
Nachhallzeit, beeinflussen.
Für die Anwendung bei kopf-
bezogener Aufnahmetechnik
ist allerdings darauf zu ach-
ten, daß auch die Ausgangs-



⑤ Prototyp eines Außenohr- simulators (RWTH Aachen, Institut für Elektrische Nachrichtentechnik 1985).

dort durchgeführten Filte-
rung ist die Zuordnung jeder
beliebigen Position für die
Eingangssignale möglich.

Auf diese Weise kann synthe-
tisch eine Kunstkopfaufnah-
me erstellt werden, die über

signale dieser Hallgeräte wie-
derum mit der Außenohr-
Übertragungsfunktion für die
gewünschte Schalleinfall-
richtung gefiltert werden
müssen. Wie mit Hilfe han-
delsüblicher Effektgeräte un-
ter Verwendung eines
Außenohrsimulators bei-
spielsweise unterschiedliche
Räume simuliert werden kön-
nen, zeigt Bild 4. Dazu dienen
mindestens drei Hallgeräte

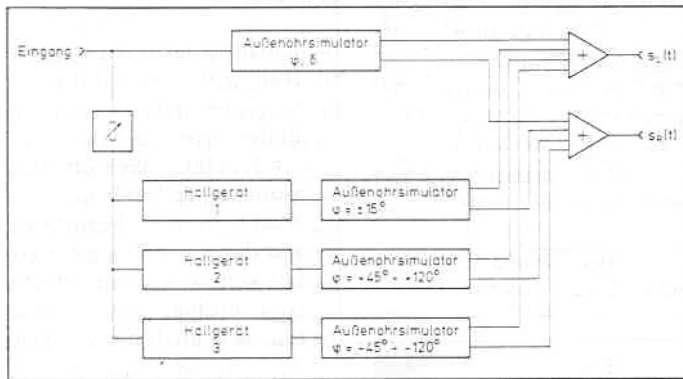
*Ein Signalprozessor ist ein sehr leistungsfähiger Mikroprozessor, dessen Befehlssatz speziell auf die Anforderungen der digitalen Signalverarbeitung hin optimiert wurde.

Grundlagen der HiFi-Technik XLVII

und Außenohrsimulatoren oder ein entsprechend modifiziertes Mischpult.

Die Ausgangssignale der Hallgeräte bekommen unterschiedliche Schalleinfallrichtungen zugeordnet und lassen sich den Signalen der anderen Kanäle zumischen.

Bei Anwendung dieser Methode erhält man zwar nur eine Approximation der Verhältnisse in realen Räumen, der subjektive Raumeindruck ist jedoch schon sehr zufriedenstellend. Detaillierte Informationen zur beidohrigen (binauralen) Simulation von Hall finden sich in /6/. Langfristig werden auch für den Studiomarkt Effektgeräte erhältlich sein, die binaural gefilterte Ausgangssignale erzeugen, so daß neben den üblichen einstellbaren Parametern auch eine zu simulierende Richtung der verschiedenen Reflexionen eingestellt werden kann und die aufwendige Simulation mit mehreren Hallgeräten überflüssig macht.



schen rechtem und linkem Ohrsignal, die bei seitlich ausgerichteten Schallquellen sofort eine Detektion der Schalleinfallrichtung erlauben, existieren dort nicht /9/, /6/.

Die entsprechenden Frequenzbereiche, die charakteristisch für Schalleinfall von vorne oder hinten sind, dürfen bei der Filterung nicht beeinflusst werden /6/. Das bedeutet, daß die verwendeten Filter möglichst breitbandig sind und Anhebungen oder Absenkungen bestimmter Frequenzbereiche nicht allzu stark sein sollten. Dem Toningenieur muß dabei klar sein, welche Frequenzbereiche bestimmend für die Vorne-Hinten-Ortung sind.

④ Binaurale Hallsimulation unter Verwendung handelsüblicher Hallgeräte. φ, δ = einstellbare Winkel zur Simulation unterschiedlicher Schalleinfallrichtungen.

Weiterhin ist es unbedingt notwendig, alle Produktionen, die in dieser Technik durchgeführt werden, nicht nur über Kopfhörer, sondern auch über Lautsprecher zu beurteilen. Wird nur über Kopfhörer abgehört, so können manche Aufnahmen bei Lautsprecherwiedergabe zu hallig wirken. Ursache hierfür ist eine spezielle Eigenschaft des menschlichen Gehörs, die binaurale Hallunterdrückung.

In halligen Räumen ist der normalhörende Mensch in

der Lage, den Raumhall stark zu unterdrücken, was beispielsweise zu einer deutlich besseren Sprachverständlichkeit bei binauralem Hören führt. Somit wird auch bei kopfbezogener Wiedergabe von Musik Hall weit weniger wahrgenommen als bei der Wiedergabe über Lautsprecher. Manchmal ist auch für bestimmte Schalleinfallrichtungen bei Lautsprecherwiedergabe eine Klangverfärbung möglich, bedingt durch die Außenohr-Übertragungsfunktion. Hier kann entweder eine andere Schallquellenposition helfen oder eine Korrektur über Filter.

Werden alle diese Möglichkeiten genutzt, so bietet die Kunstkopftechnik eine Fülle neuer Gestaltungsmittel, was aber auch neue Arrangements von Kompositionen er-

fordert. Sie sind sowohl auf Lautsprecher- als auch auf Kopfhörerwiedergabe abzustimmen. Nachteile im Vergleich zur herkömmlichen stereophonen Aufnahmetechnik bei Lautsprecherwiedergabe gibt es nicht. Sowohl Aufnahmen, bei denen nur der Kunstkopf verwendet wird, als auch Multimikrofonie-Aufzeichnungen mit der kopfbezogenen Richtungscodeierung bieten ein Höchstmaß an Räumlichkeit, Transparenz und Auflösung.

Die hervorragende Räumlichkeit, die eine Kunstkopfaufnahme bietet, ist auch bei Verwendung sehr preiswerter Kopfhörer feststellbar, wie sie bei tragbaren Cassettenrecordern üblich sind. Die exakte Reproduktion aller Merkmale (Klangfarbe, Richtung, Entfernung) eines Hörereignisses bietet zwar nur ein korrekt entzerrter Kopfhörer (siehe /10/). Andererseits werden die richtungsabhängigen Übertragungseigenschaften nur von der Qualität des verwendeten Kunstkopfaufnahmesystems und des verwendeten Richtungssimulators bestimmt, so daß auch mit preiswerten Kopfhörern ein deutlich besserer räumlicher Klangeindruck erzielt wird; der Effekt der Im-Kopf-Lokalisation, der bei Kopfhörerwiedergabe von stereophon aufgenommenen Musik immer stört, tritt nicht auf. Nicht zuletzt zeigen sich auch bei Lautsprecherwiedergabe sehr gute Ergebnisse, was die bislang in Kunstkopftechnik produzierten Aufnahmen /4/, /11/ eindrucksvoll beweisen.

/1/ Zwicker, E. Psychoakustik Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982

/2/ Genuit, K. Investigations and Simulation of Vehicle Noise Using the Binaural Measurement Technique SAE Noise and Vibration Meeting, April 28-30, 1987, Nr. 870959

/3/ Friedlein, J. Kunstkopfstereophonie, ein objektives Verfahren in der Geräuschbewertung VDI-Bericht, T-30-602-058-5, 1985

/4/ Burr, H.M. Die perfekte Aufnahme stereoplay 8, 1984, S. 126

/5/ Gierlich, H.W.; Genuit, K. Aufbau und Anwendung eines elektronischen Kunstkopfes 13. Tonmeistertagung, München 1984, Berichtsband S. 103-110

/6/ Gierlich, H.W.; Genuit, K. Processing Artificial-Head Recordings 82nd AES-Convention, London 1987, Preprint 2460 (G-5)

/7/ Pösselt, Schröter, Opitz, Divenyi, Blauert Generation of Binaural Signals for Research and Home Entertainment 12th Internat. Congr. on Acoustics, Toronto, July 1986, Proceedings B1-6

/8/ Genuit, K. Ein Modell zur Beschreibung von Außenohrübertragungseigenschaften. Dissertation RWTH Aachen 1984.

/9/ Blauert, J. Räumliches Hören S. Hirzel Verlag Stuttgart

/10/ Genuit, K. Beurteilungskriterien für Kopfhörer im Studiobereich NTG-Fachberichte 91, Mannheim 1985, S. 282-289

/11/ Feld, W. Köpfchen, Köpfchen Audio 12, 1983, S. 155

Hans Wilhelm Gierlich
Institut für Elektrische
Nachrichtentechnik
RWTH Aachen
Melatener Straße 23
5100 Aachen
Telefon 0241/807676

HEAD acoustics GmbH
Kopfbezogene Aufnahme- und Wiedergabetechnik · Meßtechnik
Jülicher Straße 336, D-5100 Aach
Telefon 02 41/1 822 180