

Grundlagen der HiFi-Technik XLVI

Kunstkopfstereophonie

1. Prinzip und Realisierung



Dipl.-Ing. Hans Wilhelm Gierlich (30) studierte an der RWTH Aachen Elektrotechnik, Fachrichtung Nachrichtentechnik. Seit 1983 ist er am Institut für Elektrische Nachrichtentechnik als wissenschaftlicher Mitarbeiter auf dem Gebiet der Akustik tätig, wobei Problemstellungen aus der Psychoakustik besondere Beachtung finden.

Im Grunde genommen ist die Idee der Kunstkopftechnik ebenso einfach wie einleuchtend. Der Mensch ist in der Lage, mit nur zwei Ohren räumlich zu hören. Bei intaktem Gehör ist es möglich, Schallquellen aus jeder Schalleinfallrichtung im gesamten Raum wahrzunehmen, wobei die Winkelauflösung des menschlichen Ohres sehr beachtlich ist. Änderungen der Schalleinfallrichtung einer Schallquelle können, je nach Position der Schallquelle, im Bereich von zwei Grad wahrgenommen werden.

Geht man weiterhin davon aus, daß Schallanteile, die über Knochenschalleitungen zum Ohr übertragen werden, in der Größenordnung 40–60 dB unter dem Luftschallpegel liegen, müßte es möglich sein, bei korrekter Reproduktion der Ohrsignale das gleiche Hörereignis hervorzurufen wie im Originalschallfeld. Das heißt, es müssen lediglich die Signale am Ohrkanaleingang einer Versuchsperson oder an einer künstlichen Versuchsperson – eben einem Kunstkopf – korrekt aufgezeichnet und dem Zuhörer geeignet wiedergegeben werden.

Die Idee, Schallsignale so aufzuzeichnen wie das menschliche Ohr, ist schon recht alt (Literaturhinweise /1/). Bereits 1886 wurden in den Bell Labs die ersten Versuche zur Kunstkopfaufzeichnung durchgeführt. 1939 wurde von Philips (De Boer, Vermeulen) der Vorläufer eines Kunstkopfes entwickelt, wenn auch mit relativ ungenauer Ohrmuschelnachbildung. Weiterentwickelt wurde die Kunstkopftechnik unter anderem in Berlin, Göttingen und Aachen. Den ersten professionell eingesetzten Kunstkopf schufen 1969 Kürer, Plenge und Wilkins.

Seit 1973 wird er als „Neumann“-Kopf (zwischenzeitlich mehrfach verbessert /2/) industriell hergestellt. Die anfänglich große Begeisterung für die neue Technik legte sich jedoch schon bald. Mit diesem System aufgezeichnete Signale waren nicht lautsprecherkompatibel. Aufnahmen im Bereich der Hörschwelle aufgrund des Eigenrauschens nicht durchführbar, und auch der gewünschte räumliche Klangeindruck bei Wiedergabe über Kopfhörer war nicht zufriedenstellend.

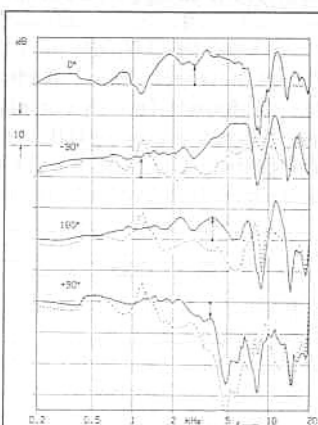
Andererseits konnte jedoch 1975 von Platte, Laws und vom Hövel /3/ gezeigt werden, daß eine zufriedenstellende Richtungsabbildung möglich ist. Mit Hilfe einer „Anordnung zur genauen Reproduktion von Ohrsignalen“ wurden sie von Versuchspersonen mittels Sondenmikrophenen im Ohrkanal aufgezeichnet. Bei der anschließenden Vorspielung mit entsprechend entzerrten Kopfhörern ließ sich bei allen Versuchspersonen eine sehr gute Richtungsabbildung erzielen, insbesondere die Fehler bei der Vorne-hinten-Ortung waren deutlich geringer.

Diese Untersuchungen führten zu einer völligen Überarbeitung des Kunstkopf-Systems. Um eine originalgetreue Wiedergabe zu erzielen, muß es Übertragungsei-

genschaften aufweisen, die denen einer „mittleren“ Versuchsperson möglichst gut entsprechen. Dazu soll es nicht nur den Kopf, sondern auch Schulter und Oberkörper nachbilden. Denn die Außenohr-Übertragungsfunktion wird nicht nur durch das äußere Ohr (Ohrmuschel, Gehörgang, Trommelfell), sondern auch durch die akustisch wirksamen Teilkörper Kopf, Schulter und Oberkörper bestimmt. Da sie alle auf die Außenohrübertragungsfunktion Einfluß haben, der zudem noch für jede Schalleinfallrichtung unterschiedlich ist, sind sie auch akustisch gesehen dem Außenohr zuzurechnen.

Das menschliche Ohr analysiert die beiden Ohrsignale hinsichtlich ihrer Laufzeitdifferenz und hinsichtlich der durch das Außenohr bewirkten, richtungsabhängigen Filterung. Dabei läßt sich in der Horizontalebene die Schalleinfallrichtung schon anhand der Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Ohrsignalen feststellen. Wesentlich für eine originalgetreue Übertragung von Schallereignissen ist jedoch nicht nur die korrekte Nachbildung dieser interauralen Laufzeit, sondern auch die richtige Filterung der beiden Ohrsignale. Besonders wichtig ist sie in der Medianebene, da dort dem Gehör keine interauralen Laufzeitdifferenzen zur Auswertung zur Verfügung stehen und die Schalleinfallrichtung nur noch anhand der Filterung der Signale durch das Außenohr erkannt werden kann.

Einige typische Außenohrübertragungsfunktionen für unterschiedliche Schallein-



1: Filterwirkung des menschlichen Außenohres. Schalldruck im linken Ohr einer Versuchsperson, Meßpunkt 4 mm im Ohrkanaleingang.

— Freifeld-Außenohrübertragungsfunktion
..... Richtcharakteristik des Außenohres

Grundlagen der HiFi-Technik XLVI

fallsrichtungen sind beispielhaft in Bild 1 dargestellt. Man erkennt, daß sie sich je nach betrachteter Schalleinfallrichtung, außerordentlich stark verändern. Weiterhin sind sie auch individuell so unterschiedlich, daß „mittlere Außenohrübertragungsfunktionen“, wie sie ja zur Konstruktion eines Kunstkopfes mit mittleren Übertragungseigenschaften notwendig wären, durch einfache mathematische Mittelungsverfahren nicht zu finden sind.

Physikalisch gesehen sind jedoch die Ursachen für die Anhebungen und Absenkungen in der Außenohr-Übertragungsfunktion Beugungen, Resonanzen und Reflexionen an den akustisch wirksamen Elementen Kopf, Schulter usw. Diese wiederum lassen sich unterscheiden in richtungsabhängige und richtungsunabhängige Einflüsse. Da alle akustisch wirksamen Elemente bei jedem Menschen vorhanden sind, liegt es nahe, eine Mittelung über die geometrischen Kenndaten verschiedener Versuchspersonen vorzunehmen. Wichtig ist vor allen Dingen die richtige Positionierung der verschiedenen Teilkörper zueinander, da sich Positionierungsfehler im richtungsabhängigen Teil der Außenohr-Übertragungsfunktionen bemerkbar machen und nachträglich nicht mehr zu korrigieren sind.

Der Einfluß des Oberkörpers findet sich im wesentlichen unterhalb von 1 kHz. Richtungsabhängig führt ein Beugungsanteil des Oberkörpers zu Anhebungen bzw. Absenkungen von ± 3 dB.

Ähnlich wie der Oberkörper übt auch die Schulter einen richtungsabhängigen Einfluß auf die Außenohr-Übertragungsfunktion aus. Beugungsanteile führen zu Anhe-

bungen und Absenkungen in der Größenordnung ± 5 dB im Frequenzbereich unterhalb von 2 kHz, wobei der Abstand zwischen Schulter und Ohrkanaleingang im wesentlichen die Lage der Anhebungen bzw. Absenkungen bestimmt.

Der Einfluß des Kopfes ist ebenfalls stark richtungsabhängig. Befindet sich eine Schallquelle auf der zugewandten Seite, so wird durch Beugungseffekte der Pegel fast im gesamten Übertragungsfrequenzbereich um zirka 6 dB angehoben. Auf der schallabgewandten Seite dagegen wird das Signal oberhalb von zirka 1 kHz tiefpaßgedämpft.

Die Ohrmuschel hat sowohl richtungsabhängig als auch richtungsunabhängig Einfluß auf die Übertragungseigenschaften. Richtungsunabhängig führt das Cavum Conchae (Ohrmuschelhöhlung) zu einer breitbandigen Überhöhung im Frequenzbereich von zirka 1 bis 10 kHz, die bis zu 20 dB betragen kann. Richtungsabhängig führen vor allen Dingen Beugungseffekte am Ohrmuschelrand zu Anhebungen und Absenkungen



2: Kunstkopfaufnahmesystem von HEAD-Acoustics, entwickelt am IENT der RWTH Aachen.

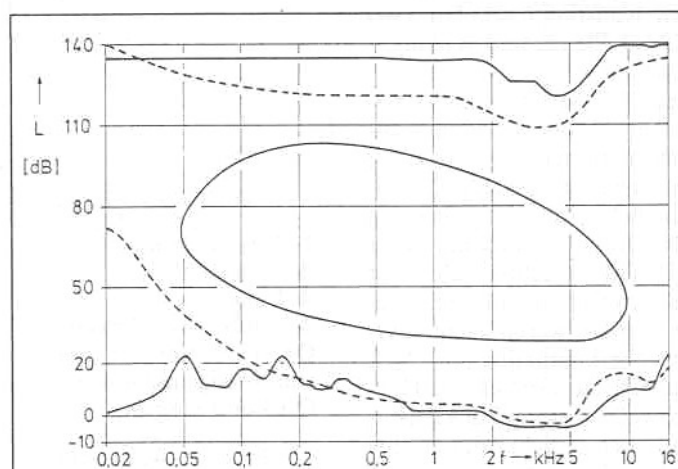
im Frequenzbereich oberhalb zirka 2 kHz.

Der Ohrkanal hat lediglich einen richtungsunabhängigen Einfluß und wird auch bei dem gezeigten Kunstkopfaufnahmesystem (Bild 2) nicht nachgebildet.

Bei der Konstruktion des Kunstkopfes (4/, 5/, Bild 2) wurde vor allen Dingen auf

die richtige Positionierung aller akustisch wirksamen Körperteile geachtet. Außerordentlich wichtig für die korrekte Richtcharakteristik ist die exakte Positionierung (räumliche Lage bezüglich der Kopfnachbildung, Abstand zur Schulter, Neigungs- und Öffnungswinkel) der Ohrmuschelnachbildung am Kopf. Den geometrischen Daten der mittleren Kopf- und für den Entwurf der Schulternachbildung lagen im wesentlichen Daten aus 16/ zugrunde.

Die Auswahl der Außenohrnachbildung ist ebenfalls von großer Bedeutung. Für den dargestellten Kunstkopf wurden die Ohrsignale einer Anzahl von Versuchspersonen in zwölf Schalleinfallrichtungen in der Horizontalebene gemessen, woraus sich mit Hilfe eines Strukturmittlungsverfahrens 7/ die mittleren, auf Schalleinfall von vorne bezogenen (monoauralen) Außenohrübertragungseigenschaften ergaben. Dann wurde die Versuchsperson ermittelt, deren Außenohr-Übertragungsfunktionen



3: Dynamikbereich des Kunstkopfaufnahmesystems aus Bild 2 (—) im Vergleich zum Dynamikbereich des menschlichen Ohres (...), die Fläche in der Bildmitte kennzeichnet den für Musik typischen Dynamikbereich in Abhängigkeit von der Frequenz.

/1/ Biauert, J.
Räumliches Hören
S. Hirzel Verlag Stuttgart

/2/ Hudde, H.; Schröter, H.
Verbesserungen am Neumann-
Kunstkopf
NTG-Fachberichte 72, Berlin 1980,
S. 25-33

/3/ Laws, P.; Platte, H. J., v. Hövel, H.
Anordnung zur genauen Reproduktion
von Ohrsignalen
Fortschritte der Akustik, DAGA 1975,
S. 351-363

/4/ Genuit, K.
Optimierung eines Kunstkopf-
Aufnahmesystems
Studio Nr. 46, 1981, S. 10-18

/5/ Genuit, K.
Ein Geräuschdiagnosesystem zur Analy-
se von Schallergebnissen unter Ausnut-
zung des Nachrichtenempfängers
„Menschliches Gehör“
Fortschritte der Akustik, FASE/DAGA
1982, S. 443-446

/6/ Burkhard, M.D.; Sachs, R.M.
Anthropometric Manikin for Acoustic
Research
J. Acoust. Soc. Am., Vol. 58 (1975),
S. 214-222

/7/ Platte, H. J.
Zur Bedeutung der Außenohrübertra-
gungseigenschaften für den Nachrichten-
empfänger „menschliches Gehör“
Dissertation TH Aachen 1979

/8/ Genuit, K.
Beurteilungskriterien für Kopfhörer im
Studiobetrieb
NTG-Fachberichte 91, Mannheim 1985,
S. 282-289

/9/ Feld, W.
Stummer Diener
Sonderdruck AUDIO 9/1983

/10/ Genuit, K.; Platte, H. J.
Untersuchungen zur Realisation einer
richtungstreuen Übertragung mit elek-
troakustischen Mitteln
Fortschritte der Akustik, DAGA 1981,
S. 629-632

/11/ Friedlein, J.
Kunstkopfsterеофонie, ein objektives Ver-
fahren in der Geräuschbewertung
VDI-Bericht, T-30-602-058-5, 1985

/12/ Genuit, K.
Investigation and Simulation of Vehicle
Noise Using the Binaural Measurement
Technique
SAE Noise and Vibration Meeting, April
28-30, 1987, Nr. 870959

/13/ Burr, H. M.
Die perfekte Aufnahme
Stereoplay 8/1984, S. 126

/14/ Feld, W.
Köpfchen, Köpfchen
AUDIO 12/1983, S. 155

möglichst gut mit den struk-
turgemittelten übereinstimmen.
Mit ihr wurden in der An-
ordnung nach /3/ Aufnahmen
durchgeführt, um vorab tes-
ten zu können, ob deren
Außenohr-Übertragungsei-
genschaften tatsächlich für eine
eindeutige Mehrheit von
Versuchspersonen die ge-
suchten mittleren Übertra-
gungseigenschaften (zufrie-
denstellender Raum- und
Klangeindruck) aufweisen.

Aus dieser Gruppe schließ-
lich wurde diejenige Person
ausgewählt, deren absolute
Außenohr-Übertragungsfunktion
eine möglichst breit-

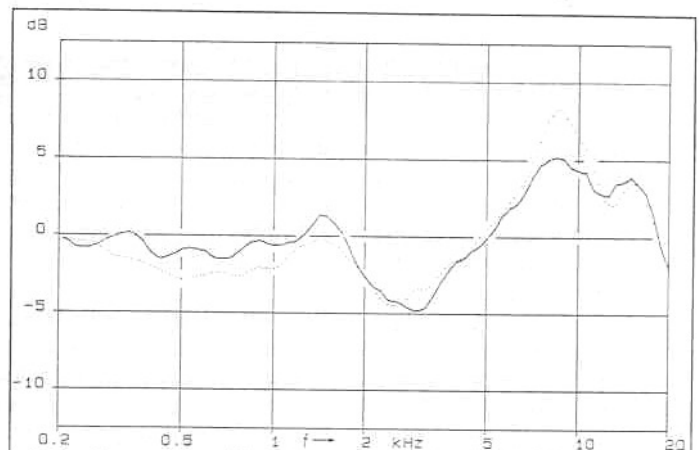
bandige, durch den richtungs-
unabhängigen Einfluß des
Cavum Conchae verursachte
Resonanzüberhöhung hat.
Sie trägt zur Verbesserung
des Signal/Störleistungsver-
hältnisses des Kunstkopfes
bei.

Gerade ein hohes Signal/Stör-
leistungsverhältnis ist mitent-
scheidend für die Qualität eines
Kunstkopf-Aufnahmesystems.
Das menschliche Ohr hat einen
für technische Begriffe sehr
großen Dynamikbereich von
über 120 dB (Bild 3). Selbst
hochwertige PCM-Aufzeichnungs-
Geräte, die immerhin einen
Dynamikbereich von 90 bis 96 dB
aufweisen, können dem Auflösungs-
vermögen des menschlichen
Ohres hinsichtlich der Dynamik
nicht gerechtwerden.

Die nötige Dynamik wird er-
reicht zunächst auf der akusti-
schen Seite durch die Opti-
mierung der Mikrofonan-
kopplung und die Ausnut-
zung der oben beschriebenen
Resonanzüberhöhung durch
das Cavum Conchae. Auf der
elektrischen Seite müssen Mi-
krofone vorhanden sein, die
bei geringen Abmessungen
einerseits ein möglichst gerin-
ges Eigenrauschen aufweisen
und andererseits die maximal
auftretenden Schalldruckpe-
gel noch unverzerrt übertra-
gen.

Probleme treten dabei vor
allen Dingen bei der Ankopp-
lung des Mikrophones an den
Ohrkanaleingang auf. Mikro-
fone mit zu großem Durch-
messer bedingen ein Luftvo-
lumen vor dem Mikrofon, das
akustisch gesehen als Tiefpaß
wirkt. Ebenfalls unabdingbar
ist ein konstantes Übertra-
gungsmaß und Phasenlinearität.
Diese Forderungen erfüllen
Kondensatormikrofone, wie
sie ursprünglich in der Me-
ßtechnik verwendet wurden,
die mittlerweile aber auch
im Studiobereich im Einsatz
sind.

Auf rauscharme Vorverstär-
ker muß besonderer Wert ge-
legt werden, um Signale, die



4: Änderung des Übertragungsmaßes bei Diffusfeldent-
zerrung eines Kunstkopfaufnahmesystems (—) und bei
richtungsneutraler Entzerrung (...), jeweils bezogen auf
Freifeldentzerrung.

sich im Bereich der Hör-
schwelle befinden, unver-
rauscht übertragen zu können
und hohe Pegelspitzen nicht
zu verzerren. Der Dynamik-
bereich des Kunstkopfsystems
aus Bild 2 im Vergleich zum
Dynamikbereich des menschi-
chen Ohres ist in Bild 3 dar-
gestellt. Es zeigt sich, daß es
durch entsprechende Kombi-
nation der beschriebenen Maß-
nahmen den Dynamikbereich
des Kunstkopfsystems über
den Bereich des menschlichen
Ohres hinaus erweitert.

Auch der Frage der Entzer-
rung kommt eine wesentliche
Bedeutung insbesondere im
Hinblick auf die Kompatibili-
tät von Kunstkopfaufnahmen
bei Lautsprecherwiedergabe
zu. Wie in Bild 1 deutlich zu
sehen, ist die Außenohrüber-
tragungsfunktion richtungs-
abhängig und weist für jede
Schalleinfallrichtung Reso-
nanzüberhöhungen und Ein-
brüche auf. Wird nur über
Kopfhörer abgehört, so ist die
Wahl einer Schnittstelle zwi-
schen Kopfhörer und Kunst-
kopf ohne Bedeutung, es
müssen lediglich die gleichen
Ohrsignale reproduziert wer-
den, wie sie in der Original-
schallsituation zu messen ge-
wesen wären.

Zum Abhören über Lautspre-
cher müssen die Kunstkopf-
signale in geeigneter Weise
gefiltert werden. Zur Zeit ge-

bräuchliche Entzerrungen
sind die Freifeld- und die Dif-
fusfeldentzerrung. Bei der
Freifeldentzerrung werden
die Ausgangssignale des
Kunstkopfes so gefiltert, daß
bei Beschallung im freien
Schallfeld (das Ohr erreichen
keine reflektierten Anteile)
von vorne die Übertrags-
funktion konstant ist. Diese
Art der Entzerrung bietet vor
allen Dingen für die Me-
ßtechnik Vorteile, da hier unter
definierten, reproduzierbaren
Bedingungen Betrag und
Phase der Übertragungsfunk-
tion bestimmt werden kön-
nen.

Bei der Diffusfeldentzerrung
wird der Kunstkopf so ent-
zerrt, daß bei Beschallung im
diffusen Schallfeld (die ein-
fallende Schallenergie ist für
jede Schalleinfallrichtung
gleich) das Übertragungsmaß
konstant ist. Der Unterschie-
d zwischen beiden Entzer-
rungsarten ist nicht sehr groß.
Für Schalleinfall von vorne
ist die Änderung des Betrages
der Übertragungsfunktion in
Bild 4 dargestellt, man er-
kennt Änderungen von ± 3
dB im wesentlichen im Be-
reich von 2 bis 10 kHz. Eine
weitere Entzerrungsmöglich-
keit wird in /8/ vorgestellt.
Die dort gewählte Schnittstel-
le unterscheidet zwischen den
richtungsabhängigen und
richtungsunabhängigen Ein-
flüssen. Auf der Kunstkopf-
seite wird der richtungsab-

Grundlagen der HiFi-Technik XLVI

hängige Teil der Außenohr-Übertragungsfunktion berücksichtigt, auf der Kopfhörerseite lediglich die richtungsunabhängigen Anteile. Der Vorteil dieser Schnittstellendefinition ist die mathematisch eindeutige Beschreibbarkeit und die Vereinfachung der Kopfhörerentzerrung. Auch die Änderung des Übertragungsmaßes bei dieser richtungsneutralen Entzerrung im Vergleich zur Freifeldentzerrung ist in Bild 4 dargestellt.

Entsprechend der gewählten Entzerrungsart sind auch die verwendeten Kopfhörer zu wählen. Wichtig ist weiterhin, daß sie in der Lage sind, den hohen Dynamikbereich des Kunstkopfsystems unverzerrt wiederzugeben. Umfangreiche Untersuchungen zeigten, daß speziell elektrostatische Kopfhörer für die Wiedergabe von Kunstkopfsignalen am besten geeignet sind (9). Das liegt einerseits an den gerin-

gen nichtlinearen Verzerrungen, die diese Kopfhörer produzieren, und andererseits an den äußerst geringen Phasenverzerrungen, die bei ihnen im Vergleich zu dynamischen Kopfhörern systembedingt sehr gering sind.

Werden bei der Konstruktion all diese Punkte beachtet, so können sämtliche Merkmale eines Schallereignisses über Kopfhörer exakt reproduziert werden. Das läßt sich am Beispiel von Richtungshörversuchen besonders gut verdeutlichen. In Bild 5 sind die Ergebnisse von quantitativen Richtungshörversuchen (14/,/10/) in reflexionsarmer Umgebung dargestellt. Es existieren vier relevante Fehlermerkmale: Die Fehlerquote F_q dient als normiertes Fehlermaß zur Beurteilung der korrekten Richtungsabbildung für alle Schalleinfallrichtungen, wobei ein F_q von 0,25 eine vollständige Richtungsinverson der vorderen

Halbebene nach hinten bedeutet. Der Fehler F_m gibt den prozentualen Anteil der falschen Antworten in der Median-Ebene an, F_i den relativen Anteil der Richtungsinversonen jeweils bezogen auf die Gesamtzahl der Vor-spielungen in der Medianebene.

Je kleiner also die Balken im Diagramm sind, desto fehlerfreier ist die Richtungsabbildung. Im Vergleich zum Richtungshören im originalen Schallfeld sind die Ergebnisse bei Verwendung eines Kunstkopfsystems älterer Bauart, der beschriebenen Sondenmikrofonaufzeichnung und eines modernen Kunstkopfaufnahmesystems dargestellt. Hier wird deutlich, daß die Ortbarkeit von Schallquellen bei Aufzeichnung mit einem guten Kunstkopfsystem fast so gut ist, als befände sich der Zuhörer in der Originalschallsituation. Bezüglich der Reproduktion des Merkmals „Klangfarbe“ stellt sich der Kunstkopf als nahezu ideales Aufzeichnungsmikrofon dar.

Nicht nur beim Einsatz in Musikproduktionen, sondern gerade auch in der Meßtechnik (/11/, /12/), wo es um kleinste, oft für den Laien gar nicht mehr wahrnehmbare Unterschiede in Geräuschen geht, bewährt sich der Kunstkopf als absolut verfärbungsfreies Aufzeichnungsmedium. Dies macht sich nicht nur bei Kopfhörerwiedergabe, sondern auch über Lautsprecher bemerkbar. Fast alle Musikproduktionen, die mit dem in Bild 2 dargestellten Kunstkopfaufnahmesystem aufgezeichnet wurden, schneiden hinsichtlich ihrer technischen Qualität ausgezeichnet ab (/13/, /14/). Dabei ist zu beachten, daß sie in der Regel über Lautsprecher und nicht über Kopfhörer spielen.

Die Kunstkopftechnik bietet also nicht nur die Möglichkeit, Schallsignale originalgetreu aufzuzeichnen und über Kopfhörer wiederzugeben, sondern ist außerdem noch voll kompatibel mit der herkömmlichen stereophonen Aufnahmetechnik. Aufnahmen, die bisher mit normalen Stereomikrofonanordnungen entstanden, lassen sich nun problemlos ohne irgendwelche klangliche Einbußen mit Hilfe der Kunstkopftechnik anfertigen. Gerade beim Genuß über Kopfhörer ergibt sich ein sehr viel natürlicheres Klangbild, eine bislang nicht gekannte Räumlichkeit, was vor allen Dingen wohl auch die Benutzer von tragbaren Cassettenrecordern zu schätzen wissen.

*Hans Wilhelm Gierlich
Institut für Elektrische
Nachrichtentechnik
RWTH Aachen
Melatener Straße 23
5100 Aachen
Telefon 02 41/80 76 76*

**In der nächsten Folge:
Kann man Kunstkopfaufnahmen überhaupt abmischen?**

5: Ergebnisse von quantitativen Richtungshörversuchen in reflexionsarmer Umgebung.

