

12

**EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

21 Anmeldenummer: 85103441.3

51 Int. Cl.<sup>4</sup>: **G 06 G 7/60**  
**H 04 R 5/027**

22 Anmeldetag: 23.03.85

30 Priorität: 27.03.84 DE 3411235  
15.03.85 DE 3509358

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
02.10.85 Patentblatt 85/40

84 Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH DE FR GB IT LI LU NL SE

71 Anmelder: **Head Stereo GmbH, Kopfbezogene Aufnahme- und Wiedergabetechnik**  
**Jakob-Klar-Strasse 14**  
**D-8000 München 40(DE)**

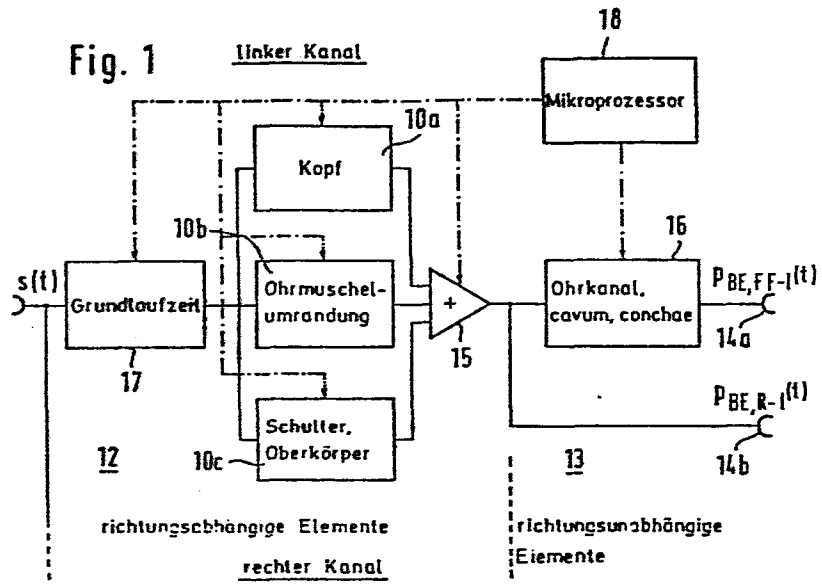
72 Erfinder: **Genuit, Klaus, Dr.**  
**Wildbacher Mühle 77**  
**D-5100 Aachen(DE)**

74 Vertreter: **Otte, Peter, Dipl.-Ing.**  
**Tiroler Strasse 15**  
**D-7250 Leonberg(DE)**

54 **Simulationsverfahren und Vorrichtung (elektronischer Kunstkopf) zur Nachbildung der Übertragungseigenschaften des menschlichen Aussenohrs bei Freifeldbeschallung.**

57 **Elektroakustisches Simulationsverfahren und eine Vorrichtung zur elektroakustischen Nachbildung des menschlichen Außenohrs mit den Übertragungseigenschaften des menschlichen Außenohrs bei Freifeldbeschallung entsprechenden Übertragungseigenschaften wird vorgeschlagen, wobei die physikalisch-akustischen Ursachen des Außenohrs, des Kopfes, des Oberkörpers, des Ohrmuschelrandes und dgl. durch einfache Teilmodelle mathematisch dargestellt und in Form von Schaltungselementen wie Hochpässe, Tiefpässe, Allpässe ... und dgl. enthaltende elektrische Schaltungen approximiert werden, mit der Möglichkeit, der kontinuierlichen Veränderung von Eigenschaften der Schaltungselemente durch Parameterveränderung derart, daß beliebige Schalleinfallrichtungen stufenlos in der Horizontal- und der Medianebene einstellbar sind.**

Fig. 1



1881 Ot/sei  
21.März 1985

Firma Head Stereo GmbH Kopfbezogene Aufnahme- und Wieder-  
gabetechnik, Jakob-Klar-Str. 14, 8000 München 40

---

Simulationsverfahren und Vorrichtung (elektronischer  
Kunstkopf) zur Nachbildung der Übertragungseigenschaften  
des menschlichen Außenohrs bei Freifeldbeschallung

---

#### Stand der Technik

5 Die Erfindung geht aus von einem Simulationsverfahren  
und einer Vorrichtung nach der Gattung des Hauptanspruchs  
bzw. des ersten Vorrichtungsanspruchs. Allgemein ist der  
Versuch, Teilsysteme eines menschlichen Außenohrmodells  
durch elektroakustische Schaltungen zu substituieren,  
10 bekannt; so beispielsweise zur Simulierung von Ohr-  
signalen bei Kopfhörerwiedergabe, die bei Freifeldbe-  
schallung aus beliebiger Schalleinfallrichtung auf-  
treten können.

Es ist auch schon versucht worden, etwa nach Art eines  
15 als Richtungsmischpult zu bezeichnenden Vorgehens elektro-  
nische Mittel vorzusehen, die für angenommene Schallein-  
fallrichtungen eine geeignete mittlere Außenohrüber-  
tragungsfunktion repräsentieren. Ein solches Richtungs-  
mischpult kann beispielsweise dadurch aufgebaut und

hergestellt werden, daß man zwar auf die eigentlichen Entstehungsmechanismen von Außenohrübertragungseigenschaften nicht eingeht, beispielsweise weil diese unbekannt sind, daß man aber durch Messung an einer Anzahl von Versuchspersonen einfach empirisch für eine vorgegebene, also endliche Anzahl von diskreten Schalleinfallrichtungen eine mittlere Außenohrübertragungsfunktion bestimmt. Eine solche, für die jeweilige Schalleinfallrichtung dann zugrunde gelegte Außenohrübertragungsfunktion ermöglicht eine Umschaltung des "Richtungsmischpultes" für die diskreten Richtungen, hat aber die Nachteile, daß

1. bislang kein Mittelungsverfahren für Außenohrübertragungsfunktionen existiert, welches mit Sicherheit zu mittleren Übertragungseigenschaften führt, die dem Nachrichtenempfänger "menschliches Gehör" tatsächlich adäquat sind;
2. daß eben nur die Einstellung einer endlichen Anzahl unterschiedlicher Schalleinfallrichtungen möglich ist; und daß
3. der sich aus einer solchen Arbeit ergebende Aufwand proportional mit der Anzahl der einstellbaren Schalleinfallrichtungen, die man wünscht, ansteigt.

Eine andere Möglichkeit zur elektronischen Nachbildung eines sogenannten Außenohrsimulators zur Simulation mittlerer Außenohrübertragungsfunktionen im Zeitbereich würde beispielsweise darin bestehen, daß an Versuchspersonen gemessene Stoßantworten für alle Schalleinfallrichtungen geeignet gemittelt und abgespeichert werden, was zunächst einen, je nach gewünschter Rasterung unter Umständen extrem hohen Speicherplatzbedarf benötigt. Das Ausgangssignal wäre in einem solchen Fall die sogenannte Faltung des

Eingangssignals mit den beiden für die jeweilige Schall-  
einfallrichtung gültigen Stoßantworten (für das linke  
und das rechte Ohr). Eine derartige Signalverarbeitung  
in Echtzeit ist jedoch praktisch unmöglich, da zumindest  
5 die zur Zeit erhältlichen Signalprozessoren nur mit er-  
heblichem Aufwand in der Lage sind, eine solche Ver-  
arbeitung durchzuführen. Aus dem gleichen Grund scheidet  
auch die Möglichkeit aus, die sogenannte Fouriertrans-  
formation des Eingangssignals vorzunehmen mit anschließen-  
10 der Multiplikation der entsprechenden Übertragungs-  
funktionen und Rücktransformation.

Herkömmliche Mischpultsysteme können zwar mit Hilfe  
der sogenannten Panoramaregler einzelne Mikrofonsignale  
derart auf die beiden Kanäle einer stereofonen Über-  
15 trägung verteilen, daß bei Wiedergabe über zwei Laut-  
sprecher in typischer Stereoaufstellung eine räumliche  
Verteilung von Hörereignissen zwischen den beiden Laut-  
sprechern entsteht (Summenlokalisation). Dieses Verfahren  
hat aber die Nachteile, daß

- 20 1. die Hörereignisse nur innerhalb des von der Laut-  
sprecheraufstellung vorgegebenen Raumwinkelbereiches  
liegen,
2. die Höhe des Hörereignisses häufig überhalb der Ver-  
bindungslinie zwischen den Lautsprechern wahrgenommen  
25 wird und abhängig von der Position des Zuhörers zu den  
Lautsprechern ist und daß
3. bei Kopfhörerwiedergabe in der Regel das Hörereignis  
im oder am Kopf des Zuhörers auftritt, da dem Gehör  
ungewohnte bzw. unnatürliche Ohrsignale angeboten  
30 werden.

Aufgrund dieser erheblichen Probleme und des großen Aufwandes dann, wenn die Ohrsignale für viele Schalleinfallrichtungen reproduziert werden sollen, existiert bisher keine praktisch brauchbare Realisierungsform  
5 eines sogenannten elektronischen Kunstkopfes oder Außenohrsimulators.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, hier Neuland zu betreten und einen Außenohrsimulator als sogenannten elektronischen Kunstkopf zu schaffen, der in der  
10 Lage ist, ohne größeren Aufwand eine stufenlose Richtungseinstellung unter Berücksichtigung der menschlichen Außenohrübertragungseigenschaften, und zwar nach Betrag und Phase für alle Frequenzen zu liefern, und der dabei trotz des vereinfachten Aufbaus mit besonders hoher Genauig-  
15 keit arbeitet, also die Simulation so durchführt, daß die Übertragungseigenschaften der elektroakustischen Ersatzschaltung des Außenohrs denen des menschlichen Außenohrs bei Freifeldbeschallung praktisch identisch entsprechen.

#### 20 Vorteile der Erfindung

Die Erfindung löst diese Aufgabe mit den kennzeichnenden Merkmalen des Hauptanspruchs sowie den kennzeichnenden Merkmalen des ersten Vorrichtungsanspruchs und hat den Vorteil, daß mit geringem Aufwand einer beliebigen Schalleinfallrichtung im Freifeld entsprechende Ohrsignale  
25 erzeugt werden können, die etwa einer Kopfhörerwiedergabe dienen können. Hierdurch ist die Realisierung eines natürlichen Klangbildes möglich. Vorteilhaft ist ferner, daß, obwohl, wie dem Fachmann bekannt, gerade Außenohrübertragungsfunktionen besonders komplizierte Strukturen  
30 aufweisen, die für die praktische Realisierung des erfindungsgemäßen Außenohrsimulators notwendige Schaltungs-

teile auf Laufzeiten, einfache Filter, Hoch- und Tiefpässe  
gegebenenfalls Resonanzsysteme beschränkt sind. Dabei  
lassen sich die für die Einstellung der Schaltungen beim  
Betrieb erforderlichen Parameter wie Größe einer Lauf-  
5 zeit oder Grenzfrequenz eines Tiefpasses direkt mit  
Hilfe eines Modells zur analytischen Beschreibung der  
Außenohrübertragungseigenschaften aus physikalisch vorgegebenen geo-  
metrischen Abmessungen bestimmen. Es ändern sich für die  
verschiedenen Schalleinfallrichtungen außer den Lauf-  
10 zeiten nur wenige Filterparameter des durch eine elek-  
tronische Schaltung dargestellten Modells des elektro-  
nischen Kunstkopfs. Es ist daher möglich, durch Be-  
stimmung nur weniger Parameter die Übertragungsfunktion  
für eine Schalleinfallrichtung zu simulieren, wobei es  
15 ferner möglich ist, zur Nachbildung mittlerer Außenohr-  
übertragungsfunktionen die Werte der gemittelten geo-  
metrischen Kenngrößen fest zu programmieren, so daß man  
in weiterer, praxisgeeigneter Vereinfachung die ent-  
sprechenden Steuerparameter von einer elektronischen  
20 Logikschaltung, Mikrorechner oder Mikroprozessor direkt  
berechnet und an die steuerbaren Schaltungsblöcke je-  
weils übergeben werden, die Einzelelemente des elek-  
tronischen Kunstkopfes simulieren. Dadurch ist es mög-  
lich, ohne großen Speicherplatzbedarf beliebig feine  
25 Unterteilungen des Winkelbereichs sowohl in der Horizon-  
tal- als auch in der Medianebene zu realisieren, so daß  
für effektiv jede Schalleinfallrichtung, auch und ins-  
besondere in der Vertikalen im Freifeld die entsprechen-  
den Ohrsignale erzeugt werden können.

30 Der elektronische Kunstkopf entsprechend der Erfindung  
erzeugt dem Gehör vertraute Ohrsignale, so daß einerseits  
die Im-Kopf-Lokalisation vermieden und andererseits die  
Einstellung von beliebigen Hörereignisrichtungen möglich  
wird. Dies eröffnet völlig neue Perspektiven nicht nur  
35 für die Kunstkopftechnik, sondern auch für die Mehrspur-

aufnahmetechnik. In der Kunstkopftechnik ist es mit dem elektronischen Kunstkopf möglich, Signale von Stützmikrofonen räumlich korrekt der kopfbezogenen Aufnahme zuzumischen. In der Mehrspuraufnahmetechnik können durch  
5 Einsatz des elektronischen Kunstkopfes die Signale von Einzelschallquellen so umcodiert werden, daß bei kopfbezogener Wiedergabe der gesamte, dem menschlichen Gehör zur Verfügung stehende Bereich zur Erzeugung von Hörereignissen ausgenutzt werden kann. Dabei kann die Hörereignisrichtung auch während einer Aufnahme verändert werden,  
10 so daß Bewegungen einer Schallquelle simuliert werden können. Die Lautsprecherkompatibilität des elektronischen Kunstkopfes ist vergleichbar mit Kunstkopf-Aufnahmesystemen, da beide Systeme zueinander äquivalente  
15 Freifeldübertragungseigenschaften aufweisen bzw. approximieren.

Weitere Verbesserungen und Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche und in diesen niedergelegt. Hierbei ist besonders vorteilhaft, daß es möglich ist, die fest gespeicherten geometrischen Kenn-  
20 größen auch abzuändern, wodurch sich dann andere Außenohrübertragungsfunktionen nachbilden lassen. Über eine Schnittstelle kann der erfindungsgemäße Außenohrsimulator ferner an einen externen Rechner angekoppelt werden, so daß die individuellen Übertragungsfunktionen von Versuchspersonen oder aber auch die Auswirkung von Hörgeräten (HDO-Geräte, Im-Ohr-Geräte), Anomalie der Ohrmuschel oder Änderung der Trommelfellimpedanz elektrisch nachgebildet werden können.

#### Zeichnung

30 Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein stark schematisiertes Blockschaltdiagramm des erfindungsgemäßen Außenohrsimulators, aus dem  
35 auch die Unterteilung in richtungsabhängige Schaltungselemente und richtungsunabhängige Schaltungselemente hervorgeht,

die Fig. 2a und 2b den Verlauf einer entsprechend vor-  
liegender Erfindung simulierten Freifeld-Außenohr-  
übertragungsfunktion (I) im Vergleich zu einer  
gemessenen (II) über der Frequenz und die Kurven-  
5 verläufe (1), (2), (3) die Simulation einzelner  
akustisch wirksamer Parameter, nämlich des Ohr-  
kanals (Kurve 1), der Schulter- und des Ohrmuschel-  
randes (Kurve 2) und des cavum conchae (Kurve 3);

Fig.3 ein detaillierteres Ausführungsbeispiel, noch im-  
10 mer in vereinfachter Form und lediglich der  
richtungsabhängigen Elemente für einen Kanal  
(einkanaliges Blockschaltbild des Außenohrsimu-  
lators - richtungsbestimmender Teil),

Fig.4 das Prinzipschaltbild einer praxisgerechten Aus-  
15 führungsform unter Steuerung der Parameter der je-  
weiligen Schaltungselemente durch ein Mikro-  
prozessorsystem und unter Beachtung gespeicherter  
gemittelter geometrischer Kenngrößen,

Fig.5 in größerem Detail eine mögliche Ausführungsform  
20 eines spannungsgesteuerten Tiefpaß-/Hochpaß-Filters,  
wie er zur Realisierung des erfindungsgemäßen  
elektronischen Kunstkopfs Verwendung finden kann,

Fig.6 das Blockschaltbild einer Interface-Schaltung zur  
Erzeugung von Steuerspannungen für die einzelnen  
25 Schaltungsblöcke zur Veränderung von deren Para-  
meter, unter der Führung eines Mikroprozessors und

die Fig. 7 und 8 jeweils für zwei verschiedene Schallein-  
fallswinkel in Form von Diagrammen den Verlauf von  
Freifeld-Außenohrübertragungsfunktionen (hier des  
30 linken Ohres) einer individuellen Versuchsperson  
im Freifeld (Horizontalebene), wobei der dick durch-  
gezogene Kurvenverlauf die Rechnung anhand des durch

die Erfindung realisierten Modells und die gestrichelten Funktionen die Standardabweichung einer vorgegebenen Anzahl von Messungen an derselben Versuchsperson darstellen.

5 Beschreibung der Ausführungsbeispiele

Der Grundgedanke vorliegender Erfindung besteht darin, die physikalischen Ursachen der Außenohrübertragungseigenschaften durch Unterscheidung und Rückführung auf vorgegebene, anschließend vereinfachte akustische Elemente aufzuteilen, also beispielsweise Oberkörper, Schulter, Kopf, Ohrmuschel mit cavum conchae-Höhlung, Ohrkanal und Trommelfell; alle diese Körper üben entsprechend ihren geometrischen Abmessungen in Abhängigkeit der Frequenz unterschiedliche Einflüsse auf die Außenohrübertragungseigenschaften aus, wobei sich dann die resultierende Übertragungsfunktion des Außenohrs aus den komplexen Überlagerungen der von allen Teilkörpern verursachten Resonanzen, Reflektionen und Beugungswellen zusammensetzt.

Richtungsabhängige Merkmale werden im wesentlichen von den Elementen, Oberkörper, Schulter und Ohrmuschelrand bestimmt. Die prinzipielle Berechnung solcher Abhängigkeiten ist zwar möglich (und zwar mit dem KIRCHHOFF'schen Beugungsintegrals, abgeleitet aus dem GREEN'schen Satz), jedoch ungeeignet für eine anschauliche Darstellung, die aber zur Beschreibung der mittleren Außenohrübertragungsfunktion und deren Simulation in einem Modell, wie durch die Erfindung angestrebt, benötigt wird.

Es ist daher von Bedeutung, daß die Erfindung sich aus der Berechnung komplizierter und aufwendiger Beugungsintegrale löst und Beugung und Reflektion an einem

Körper mit Mitteln der Systemtheorie beschreibt, was erst die technische Realisierung eines elektronischen Außenohrsimulators ermöglicht, dann allerdings mit vergleichsweise einfachen Mitteln.

5 Die Erfindung geht daher an die Lösung des Problems nicht empirisch heran, sondern beginnt mit der Betrachtung und Zugrundelegung der mathematisch effektiv bestimmten, komplexen Beugungs- und Reflexionsverhältnisse und der sich hierdurch ergebenden Übertragungsfunktionen, die durch analytische  
10 Betrachtung in ein (vereinfachtes) Modell überführt werden, welches durch elektrische Schaltungen darstellbar ist, wobei beispielsweise Ohrmuschel oder Kopf dann durch die zunächst mathematische Betrachtung der Überlagerung mehrerer Beugungskörper in Form bestimmter Schaltungen  
15 dargestellt werden, wobei für die Gesamt-Außenohrübertragungsfunktion eine komplexe Addition der jeweiligen reflektierten und gebeugten, durch die elektrischen Schaltungsblöcke simulierten Schallanteile der entsprechenden Körperteile oder -bereiche vorgenommen werden.  
20 Eine lagenunterschiedliche Ebene wird durch eine zusätzliche Laufzeit berücksichtigt (Superpositionsprinzip).

Ohne daß die Beschreibung durch komplizierte mathematische Zusammenhänge überlastet werden soll, was zum Verständnis der Erfindung auch nicht erforderlich ist, wird an einem  
25 nachfolgenden Beispiel gezeigt, was hierunter zu verstehen ist. Um beispielsweise die Übertragungsfunktion des cavum conchae anzugeben - diese umfaßt Grundresonanzen und ist, ebenso wie der Einfluß des Ohrkanals und der Trommelfellimpedanz in diesem Fall richtungsunabhängig -  
30 kann das cavum conchae als ein System, bestehend aus mehreren ineinander geschachtelten Öffnungen aufgefaßt

werden mit der folgenden Übertragungsfunktion:

$$\frac{P_{cc}}{P_0} = \prod_{n=1}^3 \left[ \cos(kl_n) - \frac{K_1(2kr_n)}{2(kr_n)^2} \sin(kl_n) - j \left( 1 - \frac{J_1(2kr_n)}{kr_n} \right) \sin(kl_n) \right]^{-1}$$

5 Diese Funktion umfaßt mit  $K_1$  sogenannte Rayleigh-Struve-Funktionen und mit  $J_1$  sogenannte Bessel'sche Funktionen, wobei mit  $l_n$  noch der Länge entsprechende Angaben und mit  $r_n$  dem Radius entsprechende Angaben von n-Öffnungen zu verstehen sind, mit  $k =$  Wellenzahl ( $\lambda/c$ ).

10 Eine solche Übertragungsfunktion erfährt mit guter Näherung eine Approximierung durch eine Laufzeit in Verbindung mit einem Resonanzsystem, wie folgt:

$$15 \quad \frac{P_{cc \text{ approx.}}}{P_0} = e^{-jk \sum_{n=1}^3 l_n} \prod_{n=1}^3 \left( 1 + \frac{V_n}{1 + j\Omega_n} \right) \quad \Omega_n = \left( \frac{f}{f_{0n}} - \frac{f_{0n}}{f} \right) Q_n,$$

wobei  $V_n$  der Verstärkung,  $Q_n$  der Güte und  $f_{0n}$  der Resonanzfrequenz der Öffnung n entspricht und die Parameter des Resonanzsystems - Resonanzfrequenz, Güte, Verstärkung - in einem funktionalen Zusammenhang zu den geometrischen  
20 Abmessungen - Radius und Tiefe - der Ohrmuschelöffnungen stehen.

Die Erfindung basiert daher auf der Erkenntnis, daß die äußere, akustisch wirksame Geometrie eines Menschen in einem mathematisch zumindest in guter Näherung beschreib-  
25 baren Zusammenhang zur gemessenen Außenohrübertragungsfunktion steht. Ausgehend von mittleren geometrischen Abmessungen kann daher auf diese Weise für jede Schalleinfallrichtung ohne zusätzlichen Aufwand eine mittlere Außenohrübertragungsfunktion bestimmt werden, die in geeigneter Weise die für das menschliche Gehör erforderlichen  
30

Übertragungseigenschaften, da alle für die Signalanalyse-  
und Mustererkennungsprozesse im Gehör erforderlichen  
Merkmale aufgrund des physikalischen Zusammenhangs von  
Außenohr und dessen Übertragungseigenschaften berück-  
sichtigt werden, repräsentiert. Die Realisierung wird  
dann durch die Annahme möglich, daß diese mathematisch  
beschreibbaren physikalischen Ursachen der Außenohrüber-  
tragungseigenschaften mit einem Modell, das auf aus der  
Nachrichtentechnik bekannten Systemen (Hoch- und Tief-  
pässe, Laufzeitglieder, Resonanzelemente und dgl.) ba-  
siert, approximiert werden können. Dieses Modell erlaubt,  
die Außenohrübertragungsfunktion für alle Schalleinfall-  
richtungen direkt anhand physikalischer Kenngrößen durch  
Variation weniger Parameter zu approximieren.

Das System Außenohr mit seinen richtungsabhängigen Über-  
tragungseigenschaften beschreibt im nachrichtentech-  
nischen Sinne die frequenzabhängigen Verzerrungen, die  
die Schallsignale in Abhängigkeit der Schalleinfall-  
richtung bei der Umcodierung in Ohrsignale für den Nach-  
richtenempfänger "menschliches Gehör" erfahren.

Im folgenden soll anhand eines Beispiels, nämlich des  
Kopfes, der angenähert durch einen Ellipsoid beschrieben  
werden kann, dargetan werden, wie Beugung und Reflexion  
mit Hilfe eines Modells approximiert werden können.

Es wird hier zunächst verwiesen auf das in Fig. 3 ge-  
zeigte Blockschaltbild des richtungsbestimmenden Teils  
eines Außenohrsimulators 10 - nur ein Kanal -, wobei  
unterteilt durch strichpunktierte Linien die Approxi-  
mation durch Schaltungsblöcke für den Bereich Kopf bei  
10a, für den Bereich Ohrmuschel bei 10b und für den Be-  
reich Schulter und Oberkörper bei 10c dargestellt ist.

Basierend auf der Annahme, daß sich Beugung und Reflexion an einer kreisrunden Scheibe beispielsweise sehr gut mit einem einfachen Modell approximieren lassen, welches aus zwei Laufzeitgliedern und einem Tiefpaß besteht, (wenn man zunächst von einfachen geometrischen Grundfiguren ausgeht) wird bei der Approximation des Kopfmodells davon ausgegangen, daß der Schalldruckverlauf in einem Punkt auf einen Ellipsoid als Kopfnäherung in Abhängigkeit der Schalleinfallrichtung durch die bei 10a angegebenen Schaltungsblöcke eines Teilmodells approximiert werden kann, wobei die Parameter dieses Modells in einem funktionalen Zusammenhang zu den geometrischen Abmessungen des betrachteten Körpers stehen; sie berücksichtigen auch Spezialfälle wie Kugelkopf, Ellipse und kreisförmige Scheiben. Dabei ist bei sämtlichen beispielsweise in Fig. 3 gezeigten Schaltungsblöcken unter K ein Koeffizientenglied, mit T und beliebigem Index ein Laufzeitglied, mit TP ein Tiefpaß und mit HP ein Hochpaß besteht. Der physikalische Bezug des bei 10a für den Kopf repräsentativen Modells ist folgendermaßen. Zur direkt einfallenden Schallwelle wird, abhängig vom Schalleinfallswinkel, das vom Ellipsoid (Kopf) reflektierte Schallfeld zuaddiert, durch die Blöcke  $K_1$  und  $HP_1$ . Das von der Umrandung ausgehende Beugungsfeld wird in zwei Anteile aufgeteilt. Der Zweig mit den Elementen  $K_3$ ,  $HP_3$  und  $T_2$  repräsentiert den dem Schallquellenort zugewandten Anteil der Beugungswelle, der Zweig mit den Elementen  $K_2$ ,  $HP_2$ ,  $T_1$  und TP den dem Schallquellenort abgewandten Teil. Die Grenzfrequenzen der Hoch- und Tiefpässe, die Beträge der Laufzeit und die Koeffizienten bestimmen sich direkt aus den Parametern Kopfgröße, Schalleinfallrichtung und Position des Ohrkanaleingangs. Wie für den Kopf läßt sich auch der Einfluß der Beugungskörper Schulter (mit den Elementen  $K_S$ ,  $HP_S$ ,  $P_S$  und  $TP_S$ ), Oberkörper ( $K_O$ ,  $HP_O$ ,  $T_O$  und  $TP_O$ ) und

Tabelle

Geometrische Daten von 6 männlichen Versuchspersonen

(m = Mittelwert,  $\sigma$  = Standardabweichung)

Nr.	Parameter		m	$\sigma$
5	1*	Schulterbreite	<mm> 496	28
	2*	Schultertiefe	<mm> 269	29
	3*	Schulterschräge	< $^{\circ}$ > 23.3	2.9
	4*	BP über Schulter	<mm> 160	11
	5*	BP von oben	<mm> 156	11
10	6*	BP von unten	<mm> 105	5
	7*	BP von vorne	<mm> 116	6
	8*	BP von hinten	<mm> 102	5
	9*	BP Winkel	< $^{\circ}$ > 11.9	4.6
	10*	Kopfbreite	<mm> 177	15
15	11*	Kopfhöhe	<mm> 261	10
	12*	Kopftiefe	<mm> 218	6
	13*	Kopfradius oben	<mm> 86	9
	14*	Mitte über BP	<mm> 70	11
	15*	Kopfradius unten	<mm> 66	13
20	16*	Mitte unter BP	<mm> 25	7
	17*	Kopfradius seitlich	<mm> 109	7
	18*	Mitte über BP	<mm> 41	13
	19*	Mitte neben BP	<mm> 14	10
	20*	Halsbreite	<mm> 104	8
25	21*	Halstiefe	<mm> 117	10
	22*	Halswinkel	< $^{\circ}$ > 35.9	3.1
	23*	Kinn vor BP	<mm> 94	5
	24*	Ohrmuschel Höhe	<mm> 70	6
	25*	Ohrmuschel Breite	<mm> 35	3
30	26*	Ohrmuschel Neigung	< $^{\circ}$ > 12.4	5.3
	27*	Mitte über BP	<mm> 13	2
	28*	Mitte neben BP	<mm> 5	1
	29*	Cavum conchae Höhe	<mm> 30	2
	30*	Cavum conchae Breite	<mm> 21	1
35	31*	Cavum conchae Tiefe	<mm> 19	2
	32*	Mitte über BP	<mm> 4	1
	33*	Mitte neben BP	<mm> 8	1
	34*	Kopfradius oben	<mm> 81	11

Ohrmuschel (mit den Elementen  $K_a$ ,  $T_a$  und  $TP_a$  sowie  $K_z$ ,  $T_z$ ) mit dem in Fig. 3 insoweit dann für die richtungsabhängigen Elemente gezeigten Modell hinreichend genau beschreiben.

5 Die auf der vorhergehenden Seite angegebene Tabelle be-  
trifft durch Messung ermittelte geometrische Daten von  
sechs Versuchspersonen, diese Daten können als geo-  
metrische Mittelwerte bei Bezugnahme der Parameter der  
einzelnen Approximations-Elemente wie in Fig. 3 gezeigt,  
10 und der Berechnung der Schaltungselemente zugrunde ge-  
legt werden. Dabei können zur Nachbildung mittlerer  
Außenohrübertragungsfunktionen die Werte der gemittelten  
geometrischen Kenngrößen, wie weiter unten noch erläutert  
wird, fest programmiert werden.

15 Lediglich als Beispiel und nicht als die Erfindung ein-  
schränkend zu verstehen sind im folgenden noch mathe-  
matische Zusammenhänge aufgeführt, die erkennen lassen,  
wie die im Modell hier der Fig. 3 verwendeten Parameter  
(Koeffizient, Laufzeit, Hochpaß, Tiefpaß) in einem in-  
20 soweit jetzt vereinfachten, mathematischen Zusammenhang  
zu den geometrischen Abmessungen (Parameter\*) der Tabel-  
le auf Seite 12 stehen.

Ohrmuschel:

$$\begin{aligned} T_a(r_a, r_b, \theta) &= T_o \cdot (2 - K_e), & T_o &= r_a / c \\ 25 \quad T_z(r_a, r_b, \theta) &= T_o K_e \\ K_z(r_a, r_b, \theta) &= 0.5 K (1 + |\sin(\theta)|) \\ K_a(r_a, r_b, \theta) &= 1 - K_z(r_a, r_b, \theta) \end{aligned}$$

$$f_{g, TP_a}(f, r_a, r_b, \theta) = \frac{2 \cdot c}{\pi \cdot e} |\cot(\arccos(e \cdot \cos(\theta)))|$$

$$30 \quad e = \frac{2 \cdot r_b}{r_a + r_b}, \quad K_e = e \cdot (1 - |\sin(\theta)|)$$

mit  $\theta$ : Schalleinfallswinkel

$r_a$ : Hälfte des Parameters Nr. 24\*

$r_b$ : Hälfte des Parameters Nr. 25\*

Weiteres Beispiel Kopf:

0156334

$$K_1 = \frac{\cos(\theta) + 0.5 \cdot R/r' \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta - \theta')}{|\cos(\theta)| + R/r' \cdot \sin(\theta)}$$

$$K_2 = 0.5 \cdot K \cdot [(1 - \sin(\theta)) \cdot (r' - R)/r' + 0.5 \cdot (1 - \cos(\theta)) \cdot R/(R + r')]$$

$$K_3 = 0.5 K' \cdot [(1 + \sin(\theta)) \cdot (r' - R)/r' + 0.5 \cdot (1 - \cos(\theta)) \cdot R/(R + r')]$$

$$T_1 = \frac{(r' - R) \cdot (1 - \sin(\theta))}{c} + \frac{R^2 \cdot (\pi - \theta)}{2 \cdot c \cdot r'}$$

$$T_2 = \begin{cases} \frac{(r' - R) \cdot (1 + \sin(\theta))}{c} + \frac{R \cdot (\pi/2 + \theta)}{c} & -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ \frac{(r' - R) \cdot (1 + \sin(\theta))}{c} + \frac{2 \cdot R \cdot (\pi - \theta)}{c} & 90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ \end{cases}$$

$$f_{g, Hp1} = f_{g, Hp2} = \frac{c \cdot R \cdot (2 - \cos(\theta))}{2 \pi r'^2}$$

$$f_{g, Tp} = - \frac{2 \cdot c \cdot (\cos(\theta'') + R/r' \sin(\theta))}{(r' + R \cdot \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta'')}$$

$$\theta' = \arctan(R/r')$$

$$\theta'' = \arccos(r'/r_a \cdot \cos(\theta))$$

$$r_a = \frac{R_v + R_h}{2}, \quad r_b = \frac{R_u + R_o}{2}, \quad r' = \frac{2 \cdot r_a \cdot r_b}{r_a + r_b}, \quad R = \frac{2 \cdot r' \cdot d}{r' + d}$$

$$K' = \frac{\cos(\theta - \theta') + R/r' \sin(\theta + \theta')}{|\cos(\theta - \theta')| + R/r' \sin(\theta + \theta')}$$

mit

	R	Hälfte von Nr. 10* der Tabelle		
	$R_v$	"	"	" 7*
	$R_h$	"	"	" 8*
5	$R_o$	"	"	" 5*
	$R_u$	"	"	" 6*

c Schallgeschwindigkeit in Luft  
 $f_g$  Grenzfrequenz des jeweiligen Hoch- bzw. Tiefpasses.

10 Zur vollständigen Beschreibung der strukturbestimmenden  
Merkmale muß noch der Einfluß der richtungsunabhängigen  
Elemente Ohrkanal und carvum conchae Höhlung bestimmt  
werden. Die Resonanzeigenschaft dieser Höhlung läßt sich  
sehr gut durch Bandpaßsysteme in Form von Serienschwing-  
kreisen approximieren. Die Parameter (Resonanzfrequenz,  
15 Güte und Verstärkung) stehen ebenfalls in einem funktional-  
en Zusammenhang zu den geometrischen Abmessungen der  
Höhlung. Der Ohrkanal kann als Rohr mit einer komplexen  
Abschlußimpedanz, der Trommelfellimpedanz, aufgefaßt wer-  
den. In guter Näherung wird dieses System durch ein  
20 Modell, bestehend aus Laufzeit, Hochpaß und Koeffizient  
beschrieben.

Man gelangt dann mit diesen Überlegungen zu dem in der  
Fig. 1 dargestellten, stark vereinfachten Blockschaltdiagramm  
eines Außenohrmodells, wobei nur der linke Kanal ange-  
25 geben ist; die einzelnen Blöcke dieses Modells stehen,  
entsprechend der weiter vorn schon erläuterten Ver-  
feinerung nach Fig. 3, für die entsprechenden akustischen  
Elemente, die in Fig. 1 auch angegeben sind und die grund-  
sätzlich bei allen Menschen zu finden sind, und die damit  
30 die überindividuellen Strukturen der Außenohrübertragungs-  
funktionen festlegen. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen,

das in Fig. 1 gezeigte Modell, wie weiter vorn schon kurz erwähnt, in einen richtungsabhängigen Teil 12, der zur Simulation der Richtcharakteristik des Außenohrs dient, und in einen richtungsunabhängigen Teil 13 zu unterteilen, der die Freifeld-Außenohrübertragungsfunktion simuliert. Über die Ausgänge zur Freifeldsimulation können bei Wiedergabe über einen freifeldentzerrten Kopfhörer Ohrsignale erzeugt werden, die den Ohrsignalen einer "mittleren" Versuchsperson für die eingestellten Schalleinfallrichtungen entsprechen. Der zweite Ausgang, in Fig. 1 mit 14b bezeichnet, -14a ist der freifeldentzerrte Ausgang - dient zur Nachbildung der Freifeld-Außenohrübertragungsfunktionen. Das vollständige, schematisch vereinfachte Modell der Fig. 1 ist in den notwendigen Schaltungsteilen auf Laufzeiten, einfache Filter, Allpässe und Addierer beschränkt - obwohl die Außenohrübertragungsfunktionen, wie weiter vorn erläutert, zum Teil extrem komplizierte Strukturen aufweisen -, wobei die Parameter der Schaltungsteile und -blöcke, wie Größe einer Laufzeit oder Grenzfrequenz eines Tiefpasses oder dgl. sich direkt mit Hilfe eines Modells zur analytischen Beschreibung der Außenohrübertragungseigenschaften aus physikalisch vorgegebenen geometrischen Abmessungen, nämlich aus der weiter vorn angegebenen Tabelle bestimmen lassen, mit der weiteren, ganz wesentlichen Folgerung, daß durch Variation oder Änderung solcher oder jedenfalls vorgegebener Parameter der Schaltungsblöcke hier, und wie sofort zu verstehen ist, vollständig kontinuierlich die Möglichkeit eröffnet wird, für jede Schalleinfallrichtung in Horizontal- und Medianebene die entsprechenden Ohrsignale zu erzeugen, so daß mit einem solchen elektronischen Kunstkopf ein System zur Verfügung steht, das für beliebige Schalleinfallrichtungen einer Freifeldbeschallung entsprechende Ohrsignale bei

Kopfhörerwiedergabe erzeugt und die Realisierung eines besonders natürlichen, eindrucksvollen Klangbilds ermöglicht. Dabei ist auch bei Lautsprecherwiedergabe analog zur Kunstkopftechnik eine Verbesserung der Transparenz gewährleistet. Es ergeben sich daher nicht nur spezielle Anwendungsbereiche in der Psychoakustik, auf die noch eingegangen wird, sondern es eröffnen sich hierdurch speziell in der Tonstudioteknik neue Möglichkeiten zur künstlerischen Gestaltung einer Aufnahme.

Bei dem in Fig. 1 dargestellten Modell, welches lediglich für einen Kanal durch Schaltungsblöcke zusammengefaßte Koeffizienten-, Tiefpaß-, Hochpaß-, Allpaß-, Bandpaß-, Addier-, Resonanzglieder und ähnliches umfaßt, ändern sich außer den Laufzeiten für die verschiedenen Schalleinfallrichtungen nur wenige Filterparameter. Es ist daher auch möglich, durch die Bestimmung dieser nur wenigen Parameter die Übertragungsfunktion für eine Schalleinfallrichtung zu simulieren. Die einzelnen Schaltungsblöcke sind in Fig. 1 für den Kopfbereich mit 10a', für Ohrmuschel und -umrandung mit 10b' und für Schulter und Oberkörper mit 10c' bezeichnet; ein die additive Überlagerung der jeweiligen komplexen Teilübertragungsfunktionen bewirkendes Additionsglied trägt das Bezugszeichen 15. Der Schaltungsblock des richtungsunabhängigen Teils umfaßt die Bereiche Ohrkanal und cavum conchae und ist mit 16 bezeichnet.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung bei vorliegender Erfindung besteht darin, daß alle im Außenohrmodell auftretenden Laufzeiten in einen den Schaltungsblöcken 10a', 10b' und 10c' vorgeschalteten Grundlaufzeit-Schaltungsblock 17 zusammengefaßt sind, der die erforderlichen Signalverzögerungen und Laufzeiten repräsentiert und realisiert.

Da in diesem Zusammenhang die technische Realisation der Laufzeiten unter Verwendung analoger Verzögerungsleitungen beispielsweise deshalb zu Problemen führen kann, weil neben einem unzureichenden Nutz-/Störleistungsverhältnis Mischprodukte der Frequenzen im hörbaren Frequenzbereich auftreten könnten, zieht die vorliegende Erfindung für einen qualitativ hochwertigen Aufbau eine digitale Realisation der Laufzeiten in Betracht, die im Grundsatz so erfolgt, daß alle den jeweiligen Teilmodellen oder Schaltungselementen-Ketten zugeordneten Laufzeitglieder so wie in Fig. 1 dargestellt angeordnet werden, also vor die einzelnen anderen Schaltungen gezogen werden, wodurch es möglich ist, mit nur einer Analog/Digital-Umsetzung auszukommen. Im einzelnen wird für den Grundlaufzeit-Block 17 ein 16-bit A-D/Umsetzer verwendet, der mit einer Abtastrate von hier beispielsweise 44KHz, was hinreichend hoch ist, arbeitet. Die quantisierten Abtastwerte werden nach der Umsetzung in ein Schieberegister eingelesen. Die Verzögerungszeit bestimmt sich dann durch die von einem nachfolgend noch zu erläuterndem, eine zentrale Steuerung der einzelnen Elemente bewirkendem Mikroprozessor gesteuerte Zeitdifferenz zwischen Einschreiben und Auslesen verschiedener Speicherstellen. Aufgrund der kurzen Speicherzugriffszeiten ist es während einer Abtastperiode möglich, alle Speicherstellen, die zur Laufzeitsimulation benötigt werden (pro Kanal 8 Laufzeiten - es sind linker und rechter Kanal vorhanden) auszulesen. Mit einem schnellen D-A/Umsetzer können die so verzögerten Abtastwerte im Zeitmultiplexbetrieb wieder ausgegeben werden. Unter Zugrundelegung dieser Konzeption sind dann nur ein oder zwei D-A/Umsetzer (für jeden Kanal ein Umsetzer) notwendig. Die zur Simulation notwendigen Filter und Koeffizienten werden dann vorzugsweise mit Hilfe von steuerbaren Operationsverstärkern realisiert, was weiter

5 unten noch erläutert wird. Eine digitale Filterrealisierung - beispielsweise mit schnellen Signalprozessoren - liegt ebenfalls innerhalb des erfindungsgemäßen Rahmens, es empfiehlt sich jedoch, jedenfalls derzeit insbesondere aus Kosten- und Aufwandsgründen hiervon noch Abstand zu nehmen.

10 Es ist weiter vorn schon erwähnt worden, daß, wie die Darstellung der Fig. 1 zeigt, der die Erfindung bildende elektronische Kunstkopf (Außenohrsimulator) vorzugsweise unter einer zentralen Steuerung steht, was die praktische Handhabung entscheidend vereinfacht; zu diesem Zweck ist ein Mikroprozessor 18 vorgesehen, in welchem beispielsweise auch die Werte der gemittelten geometrischen Kenngrößen fest programmiert sein können, die zur Nachbildung  
15 mittlerer Außenohrübertragungsfunktionen erforderlich sind. In entsprechender Weise können dann vom Prozessor 18 die entsprechenden Steuerparameter berechnet und direkt an die steuerbaren Schaltungsblöcke übergeben werden. Mit dieser Methode lassen sich ohne großen Speicherplatzbedarf beliebig feine Unterteilungen des Winkelbereichs in der  
20 Horizontal- und Medianebene realisieren, so daß für jede Schalleinfallrichtung im Freifeld die entsprechenden Ohrsignale erzeugt werden können. Es ist dann zusätzlich möglich, die fest gespeicherten geometrischen Kenngrößen abzuändern, wodurch sich auch andere Außenohrübertragungsfunktionen nachbilden lassen. Ferner ist es möglich, über eine Schnittstelle den erfindungsgemäßen Außenohrsimulator an einen externen Rechner zu koppeln; diese Möglichkeit  
25 ist in der detaillierteren Darstellung der Fig. 4 mit 19 bezeichnet, wo, dem Mikroprozessor 18' zugeordnet, das Tastenfeld eines externen Rechners, beispielsweise Personalcomputers, dargestellt ist.  
30

Die geradezu verblüffende Simulationsfähigkeit des erfindungsgemäßen Außenohrsimulators läßt sich den beiden Diagrammdarstellungen der Fig. 2a und 2b entnehmen, wobei die Fig. 2a eine entsprechend der Erfindung simulierte Freifeld-Außenohrübertragungsfunktion (I) - hier ohne Oberkörper-Simulation - zeigt, im Vergleich zu einer effektiv gemessenen, also empirisch ermittelten Übertragungsfunktion, wie bei (II) gezeigt. Ergänzend hierzu zeigt die Fig. 2b die Simulation einzelner, beispielsweise als Freifeld-Teilaußenohrübertragungsfunktionen zu bezeichnender akustisch wirksamer Parameter, nämlich für den Bereich Ohrkanal bei (1), den Bereich Schulter und Ohrmuschelrand bei (2) und das cavum conchae bei (3); aus diesen beiden Teilverläufen setzt sich dann die Außenohrübertragungsfunktion (I) der Abbildung 2a zusammen.

Wie weiter vorn schon erwähnt, stellen die einzelnen Schaltungselemente der Fig. 3 die Kopf-, Ohrmuschelumrandung- und Schulter/Oberkörper-Bereiche der Schaltungsblöcke der Fig. 1 detaillierter dar, sie schließen sich an den mit digitalen Elementen realisierten Grundlaufzeit-Block 17 an und enthalten jeweils einzelne, noch nicht erwähnte Additionsglieder 15a, 15b, 15c, 15d mit dem Endaddierglied 15' mit dem zu den richtungsunabhängigen Elementen weiterführenden Ausgangsanschluß 20. Die Schaltungselemente der Fig. 3 stellen den analogen Teil des mikroprozessorgesteuerten Außenohrsimulators dar, zur Realisation der Koeffizienten, der Hoch- und Tiefpässe und der deren Ausgangssignale zusammenfassenden Addierglieder.

Das detaillierte Ausführungsbeispiel der Fig. 4 stellt das Prinzipschaltbild einer möglichen Realisierungsform eines Außenohrsimulators nach vorliegender Erfindung dar,

mit einem Bedienungs- und Eingabeelemente sowie Anzeigeelemente enthaltendem Block 21, zugeordnet dem Mikroprozessorsystem 18', dem ferner eine zentrale Zeitablaufsteuerung 22 zugeordnet oder in ihm enthalten ist. Der Mikroprozessor beeinflusst über die Vielfach-Verbindungsleitungen 23a, 23b die Parameter von hier beispielsweise vorhandenen acht analogen Schaltungskanälen 24, die mit ihren Ausgängen auf das Summationsglied 15'' arbeiten. Je nach Art und Aufbau des Modells enthalten die analogen Schaltungskanäle 24 Tief- und Hochpaßfilter 24a, 24b erster bzw. dritter Ordnung, Bandpässe 24c und sogenannte Koeffizientenglieder 24d mit einer Verstärkung von  $-1 \dots +1$ . Die Laufzeitglieder für die jeweiligen Kanäle werden als digitale Verzögerungsleitungen realisiert und zu diesem Zweck so angeordnet, daß nur eine A-D/Umsetzung an einem einen Eingangs-Tiefpaßfilter 25 nachgeschaltetem Digitalisierungsblock 26 erforderlich ist. Nach der Umsetzung werden die quantisierten Abtastwerte in einen frei adressierbaren Speicher 27 (Verzögerungsspeicher RAM) eingelesen. Die sich zwischen Einlesen und Auslesen der Abtastwerte an verschiedenen Speicherstellen ergebenden Verzögerungszeiten bestimmen die Zeitdifferenz, wobei die Länge des Registers sich durch die maximal notwendige Verzögerungszeit bestimmt. Da ein Speicherzugriff im Vergleich zu der schon erwähnten Abtastrate von vorzugsweise 44KHz sehr kurz ist, können während einer Abtastperiode alle für die Simulation der verschiedenen Laufzeiten notwendigen Abtastwerte hintereinander ausgelesen werden. Es ist daher mit Hilfe eines entsprechend schnellen D-A/Umsetzers 26 möglich, die so erhaltenen Abtastwerte für die unterschiedlichen Laufzeiten im Zeitmultiplexbetrieb wieder umzusetzen, wozu nach einem Signalarückgewinnungsblock 28 schematisch ein von der zentralen Zeitablaufsteuerung gesteuerter Zeitmultiplex-Umschalter 29

angedeutet ist, dessen Ausgänge mit den Eingängen der  
verschiedenen Kanäle 24 verbunden sind. Durch die Kombi-  
nation von analogen und digitalen Schaltungsteilen ist  
einerseits eine problemlose Realisierbarkeit und anderer-  
5 seits ein äußerst vielseitiges, qualitativ hochwertiges  
Simulationssystem für die Darstellung von Außenohrüber-  
tragungsfunktionen erzielt. In Fig. 4 ist der beispiels-  
weise rechte Kanalbereich noch mit 30a, ein zugehöriger  
linker Kanalbereich mit 30b bezeichnet; den Addier-  
10 gliedern 15' ist noch ein Tiefpaß 31a, 31b jeweils nach-  
geschaltet, wobei sich am Ausgang 32a des Tiefpasses 31a  
das rechte Ohrsignal und am Ausgang 32b des Tiefpasses 31b  
das linke Ohrsignal abnehmen läßt.

Eine mögliche Realisierungsform eines beliebig als Tief-  
15 paßfilter oder Hochpaßfilter 1. Ordnung auslegbaren  
Schaltungselements ist in Fig. 5 dargestellt; das Filter  
ist mit Hilfe eines als steuerbarer Widerstand geschaltet-  
en sogenannten "Operational Transconductance Amplifier -  
OTA" 33 aufgebaut, bei dem die Vorwärtssteilheit (Trans-  
20 conductance) der Kehrwert der Verstärkung ist und mit  
Hilfe eines extern eingespeisten Gleichstroms  $I_{St}$  ein-  
stellbar ist. Dabei ergibt sich je nach Einspeisungspunkt  
dieses Gleichstrom-Eingangssignals für die Gesamtan-  
ordnung die Übertragungsfunktion entweder eines Tief-  
25 passes oder auch eines Hochpasses. Dem OTA 33 ist ein  
normaler Operationsverstärker 34 noch nachgeschaltet; der  
Steuerstrom ergibt sich durch den unteren Schaltungsteil,  
wobei die Steuerspannung  $U_{St}$  einem Operationsverstärker 35  
zugeführt und über einen FET-Transistor 36 am Ausgang zum  
30 OTA 33 gelangt; wesentlich sind lediglich noch ein am  
Rückführungszweig liegender Kondensator C und die in der  
Eingangsbeschaltung zum invertierenden Anschluß liegenden  
Widerstände R3 und R4, an eine Rückführleitung 37 ange-

geschlossen. Eine zum Steuerstrom  $I_{St}$  proportionale Grenzfrequenz ergibt sich dann bei einer solchen Schaltung beispielsweise aus folgender Formel

$$5 \quad f_g = \frac{R_4}{R_3+R_4} \cdot \frac{I_{St}}{4\eta \cdot U_{St} \cdot C}$$

Insgesamt ergibt sich durch eine solche Schaltung der Fig. 5 ein spannungsgesteuertes Tiefpaß/Hochpaß-Filterelement.

Bei der Schaltung der Fig. 6 handelt es sich um ein Blockschaltbild einer Interface-Schaltung zur Erzeugung der 10 Steuerspannungen  $U_{St}$ , die sich am Ausgang 38 der Schaltung abnehmen lassen und für die Parametereinstellung der Filter und Koeffizientenglieder benötigt werden. Der Mikroprozessor 18' (Fig. 4) schreibt das Parameter-Datenwort über eine Daten-Bus-Leitung 39 in ein Datenregister 40. 15 An dessen Ausgängen wird das Datenwort von einem Digital-/Analog-Umsetzer 41 mit nachgeschaltetem Stromspannungswandler 42 in eine Spannung von beispielsweise 0 ... -10 V umgesetzt. Über ein von der gleichen Daten-Bus-Leitung 39 20 angesteuertes Adressregister 43 wird ein Kanal eines dem Strom/Spannungswandler 42 nachgeschalteten Analog-Multiplexers 44 adressiert und somit die erzeugte Spannung zu einer entsprechenden Ausgangs-Speicherschaltung (Sample + Hold) durchgeschaltet, wobei für jedes jeweils zu steuern- 25 de Filterelement eine solche S + H-Schaltung 45 vorgesehen ist. Die Sample + Hold-Schaltung 45 besteht lediglich aus einem Speicherkondensator C und einem sehr hochohmigen Spannungsfolger 46 als Operationsverstärker. Ist der Kondensator C aufgeladen, so wird der Kanal mit einem 30 Inhibit-Signal, das vom Adressregister 43 ausgegeben wird, wieder abgeschaltet. Der gesamte Vorgang läuft in der

gleichen Weise zyklisch bei allen anderen Kanälen ab.  
Auf diese Weise werden die Spannungen an den Halte-  
Kondensatoren C jeweils wieder aufgefrischt. Eine noch  
vorhandene Dekodierlogik 47 erzeugt mit Hilfe von  
5 Adress-Bus-Eingangsleitungen 48 und Steuer-Bus-Eingangs-  
leitungen 49 vom Mikroprozessorsystem 18' die Ladeimpul-  
se für die beiden Register 43 und 40.

Die Fig. 7 und 8 zeigen schließlich in Form von Diagram-  
men für zwei verschiedene Richtungen ( $0^\circ$  bzw.  $270^\circ$ ) die  
10 Freifeld-Außenohrübertragungsfunktionen des linken Ohrs  
einer individuellen Versuchsperson im Freifeld (Horizontal-  
ebene), wobei die durchgezogene Linie durch Rechnung ent-  
sprechend dem Gegenstand vorliegender Erfindung (Modell)  
und die beiden, diese durchgezogene Linie gestrichelt  
15 oben und unten umgebenden Kurvenverläufe die Standardab-  
weichung bei sechs Messungen an derselben Versuchsperson  
darstellen; man erkennt, wie hochgenau durch die vor-  
liegende Erfindung das gesteckte Ziel eines elektronischen  
Kunstkopfes realisiert werden konnte.

20 Besonders geeignete Anwendungsbereiche für den er-  
findungsgemäßen elektronischen Kunstkopf, der anstelle  
des natürlichen Außenohrs die Transformation von Schall-  
signalen und Ohrsignalen durchführt, liegen, unter anderem  
auf den folgenden drei Gebieten:

25 1. in der psychoakustischen Forschung zur leichten Re-  
alisation von speziellen Außenohrübertragungseigen-  
schaften, z.B. zur Simulation einer Hörgerätever-  
sorgung. Da die Möglichkeit besteht, einzelne Parameter  
in kürzester Zeit einfach zu ändern, kann beispiels-  
30 weise der Einfluß von Hörgeräten oder die Aus-  
wirkungen von ein- und beidohriger Hörgerätever-  
sorgung einfach simuliert werden;

2. im medizinisch-diagnostischen Bereich zur Überprüfung  
des Richtungshörvermögens oder der Sprachverständlich-  
keit in störschallerfüllter Umgebung. So sind Hör-  
tests, insbesondere Richtungshörtests mit dem er-  
findungsgemäßen Gerät unter Freifeldbedingungen mög-  
5 lich ohne die Notwendigkeit, einen reflexionsarmen  
Raum vorzusehen, und ohne großen apparativen Aufwand;
3. im tontechnischen Bereich zur synthetischen Erzeugung  
einer kopfbezogenen Aufnahme, wobei es möglich ist,  
10 Signale für beliebige Schalleinfallrichtungen etwa  
Kunstkopfaufnahmen oder dgl. zuzumischen.

Alle in der Beschreibung, den nachfolgenden Ansprüchen und  
der Zeichnung dargestellten Merkmale können sowohl einzeln  
als auch in beliebiger Kombination miteinander erfindungs-  
15 wesentlich sein.

1881 Ot/EO  
21. März 1985

Firma Head Stereo GmbH Kopfbezogene Aufnahme- und Wiedergabetechnik  
Jakob-Klar-Str. 14, 8000 München 40

---

Patentansprüche:

1. Elektroakustisches Simulationsverfahren zur Nachbildung von dem menschlichen Außenohr bei Freifeldbeschallung entsprechenden Übertragungseigenschaften, dadurch gekennzeichnet, daß strukturbestimmende Merkmale von Außenohrübertragungsfunktionen durch Beschreibung von einzelnen akustisch wirksamen Elementen ermittelt und unter Zugrundelegung eines mindestens die Elemente Kopf- und Ohrmuschel umfassenden Modells für jedes Element durch Approximation jeweils komplexer Außenohr-Übertragungsteilfunktionen nach Betrag und Phase entwickelt und durch die Reihen- und Parallelschaltung von Hochpässe, Tiefpässe, Allpässe, Baßpässe, Resonanzsysteme, Addierer, Laufzeiten enthaltenden elektrischen Schaltungsblöcken realisiert werden, wobei Parameter (Laufzeiten, Grenzfrequenzen) der Teilmodelle bzw. des Modells zur analytischen Beschreibung der Außenohr-Übertragungseigenschaften aus physikalisch vorgegebenen, vorzugsweise gemittelten geometrischen Abmessungen bestimmt sind und beliebige Schalleinfallrichtungen kontinuierlich durch zusätzliche Verstellung der Parameter der die elektrischen Schaltungsblöcke bildenden Teilschaltungen realisiert werden.
2. Vorrichtung zur elektroakustischen Nachbildung des menschlichen Außenohrs (Freifeld-Außenohrsimulator oder elektronischer Kunstkopf), mit den Übertragungseigenschaften des menschlichen Außenohrs bei Freifeldbeschallung entsprechenden Übertragungseigenschaften, dadurch gekennzeichnet, daß die gesamten physikalisch akustischen Ursachen des Außenohrs, des Kopfes, des Oberkörpers, des Ohrmuschelrandes, der Ohrmuschel,

- 5 des Gehörkanals, des Trommelfells u.dgl. durch einfache Teilmodelle mathematisch dargestellt und in Form von Schaltungselemente wie Hochpässe, Tiefpässe, Allpässe, Bandpässe, Resonanzsysteme, Addierer, Laufzeitenglieder u.dgl. enthaltende elektrische Schaltungen approxi-
- 10 miert werden, wobei die Schaltungen oder Schaltungsblöcke der Teilmodelle additiv überlagert werden.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltungsblöcke und Schaltungselemente in einen richtungsabhängigen Teil (12) und einen sich daran anschließenden richtungsunabhängigen Teil (13)
- 15 aufgeteilt werden, wobei die Laufzeiten aus den Schaltungselementen des richtungsabhängigen Teils herausgezogen und einem vorgeschalteten Grundlaufzeitblock (17) zugeordnet sind .
4. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß jeder
- 15 für sich eine vorgegebene Anzahl von Schaltungselementen (Hochpässe 24b, Tiefpässe 24a, Bandpässe 24c, Koeffizientenglieder 24d) je nach Modell in vorgegebener Anzahl nach Art und Reihenfolge in Parallel- und Reihenschaltung enthaltender Schaltungsblock für den Kopfbereich (10a') für den Ohrmuschelumrandungsbereich (10b') und für Schulter- und Oberkörperbereich (10c') die Ausgänge der einzelnen Schaltungselemente über Addierglieder (15a, 15b, 15c, 15d) verbindet und einem End-
- 20 addierglied (15') zuführt, an welches sich der Ohrkanal und cavum conchae umfassende Schaltungsteilbereich (16) anschließt.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Parameter der einzelnen Schaltungselemente (Hochpässe 24b, Tief-
- 25 pässe 24a, Bandpässe 24c, Koeffizientenglieder 24d, Laufzeiten) aus physikalisch vorgegebenen, gemittelten geometrischen Abmessungen bestimmt sind und daß mindestens bestimmte Schaltungselemente Parameter-Verstelleinrichtungen umfassen zur kontinuierlichen Erzeugung von jeder

Schalleinfallrichtung im Freifeld entsprechenden Ohrsignalen.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur Darstellung der Verzögerungszeiten (Grundlaufzeiten) digitale Verzögerungsleitungen vorgesehen sind.
- 5 7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß zur digitalen Laufzeitbildung lediglich ein Analog/Digitalumsetzer (26) vorgesehen ist, aus welchem die quantisierten Abtastwerte des analogen Eingangssignals in ein Schieberegister (27) eingelesen werden, derart, daß die  
10 zwischen Einlesen und Auslesen der Abtastwerte an verschiedenen Speicherstellen sich ergebende Zeitdifferenz die jeweilige Verzögerungszeiten bestimmt.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Schieberegister ein frei adressierbarer Verzögerungsspeicher (RAM 27) ist.
- 15 9. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 2 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Einstellung der jeweiligen Steuerparameter der einzelnen Schaltungselemente der jeweiligen Schaltungsblöcke eine zentrale Steuer- und Speicherschaltung (Mikroprozessorsystem 18') vorgesehen ist, der die jeweils gewünschten Schalleinfallrichtungen zur  
20 Bestimmung der Steuerparameter von außen zuführbar sind.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß dem Mikroprozessorsystem (18') eine zentrale Zeitablaufsteuerung (22) zugeordnet ist, die den Digitalisierungsablauf des zugeführten analogen Eingangssignals, die Zeitdifferenzbestimmung zur Laufzeit-  
25 erzeugung am Verzögerungsspeicher sowie die Signalmrückgewinnung bestimmt und einen nachgeschalteten Signalmultiplexer (29) derart ansteuert, daß

den jeweiligen, die Schaltungselemente enthaltenden Kanäle (24) des nachfolgenden analogen Schaltungsteils die jeweils zugeordneten Laufzeiten zugeführt sind.

- 5 11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß ein spannungsgesteuertes Tiefpaß/Hochpaßfilter mit einstellbarer Grenzfrequenz ( $f_g$ ) vorgesehen ist, dem zur Änderung seiner Übertragungseigenschaften eine Steuerspannung zuführbar ist.
- 10 12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß eine vom Mikroprozessor(18')gesteuerte Vorrichtung zur Erzeugung der den jeweiligen Schaltungselementen zur Parameterbestimmung zuzuführenden Steuerspannungen vorgesehen ist, mit einem Adressen- und einem Datenregister (43, 40), einem nachgeschalteten Digital-/Analogwandler (41) und einem vom Adressregister (43) gesteuerten Multiplexer (44), der die jeweilige Ausgangssteuerspannung
- 15 jedem elektrischen Schaltungselement zugeordneten Sample-and-Hold-Schaltungen (45) zuführt.

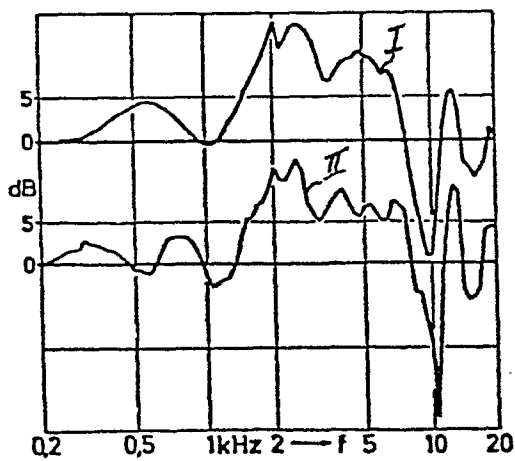
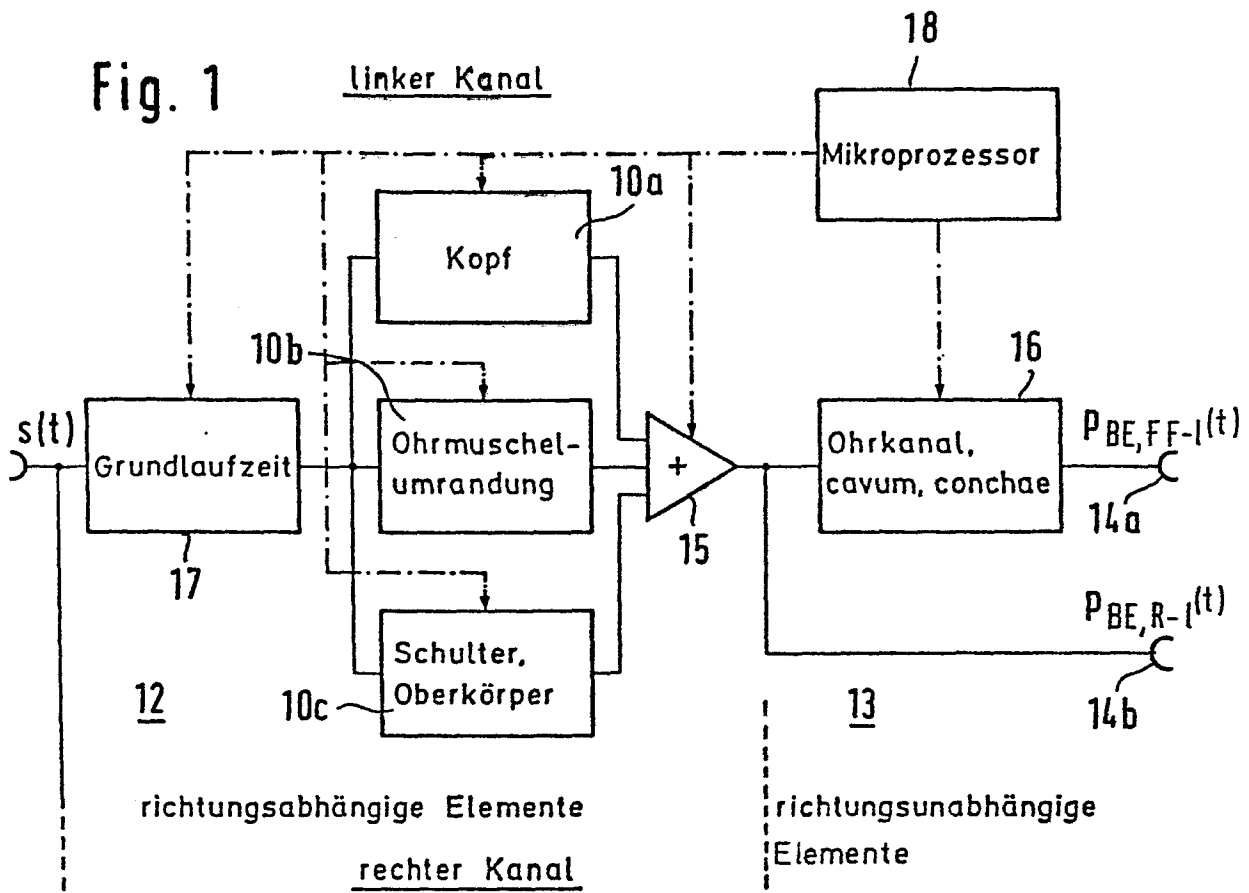


Fig. 2a

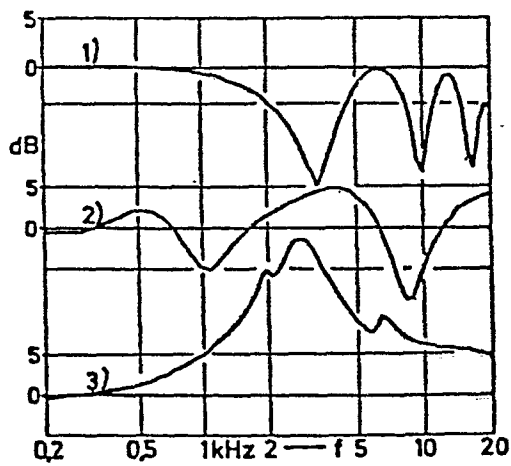


Fig. 2b



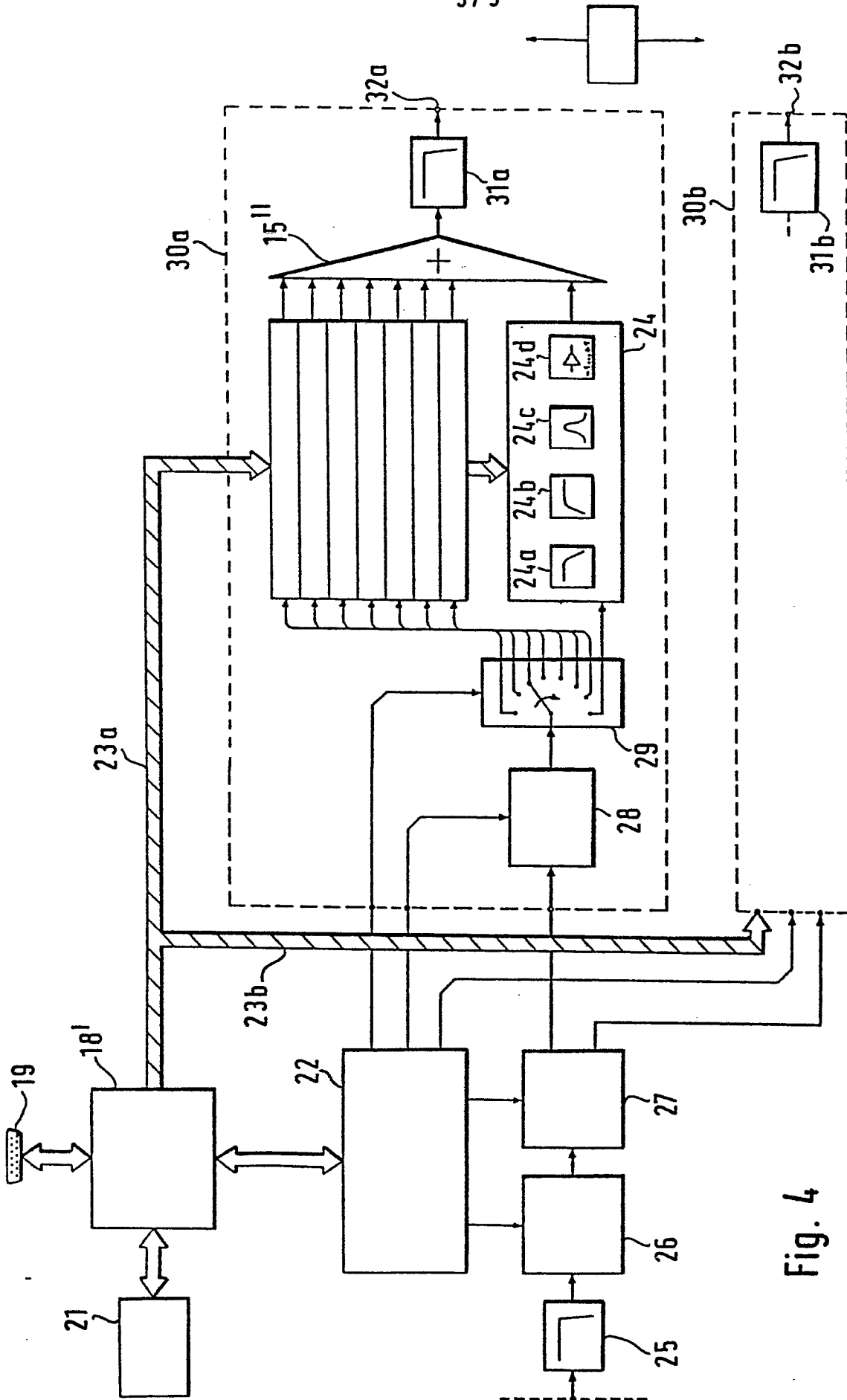


Fig. 4

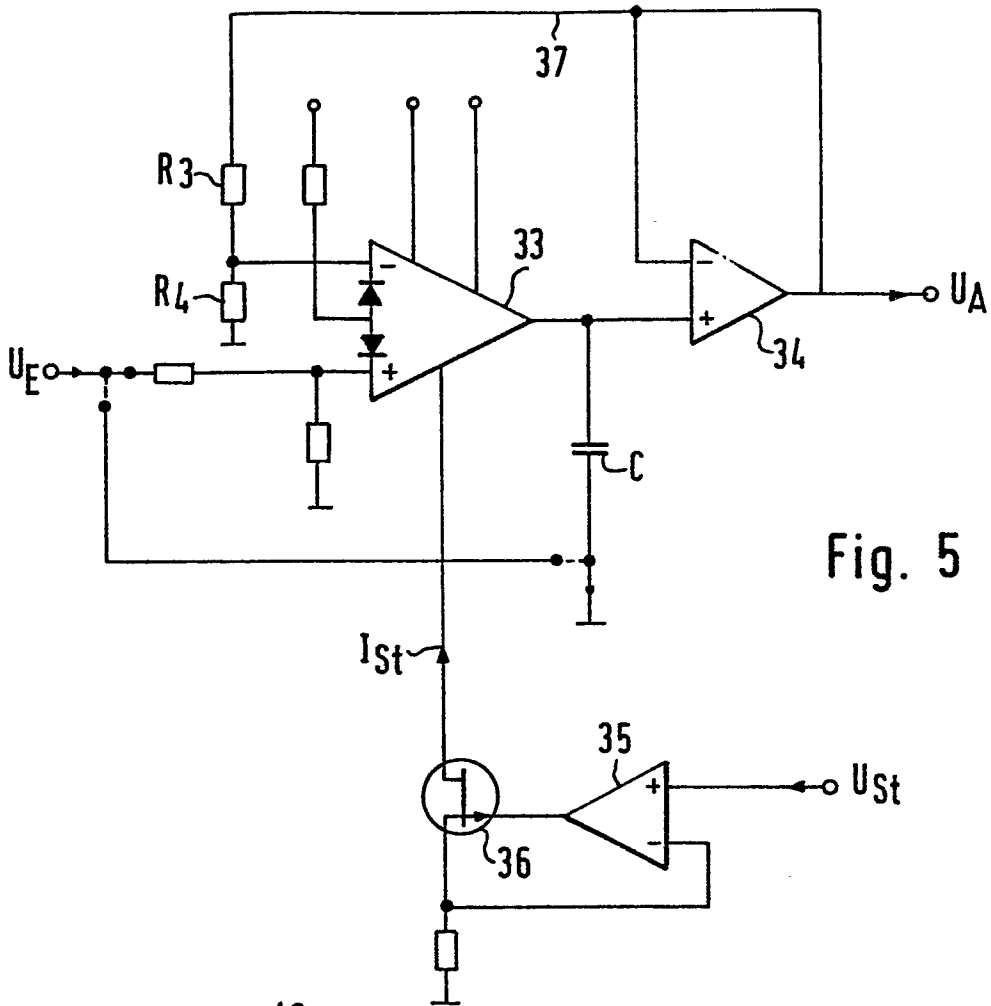


Fig. 5

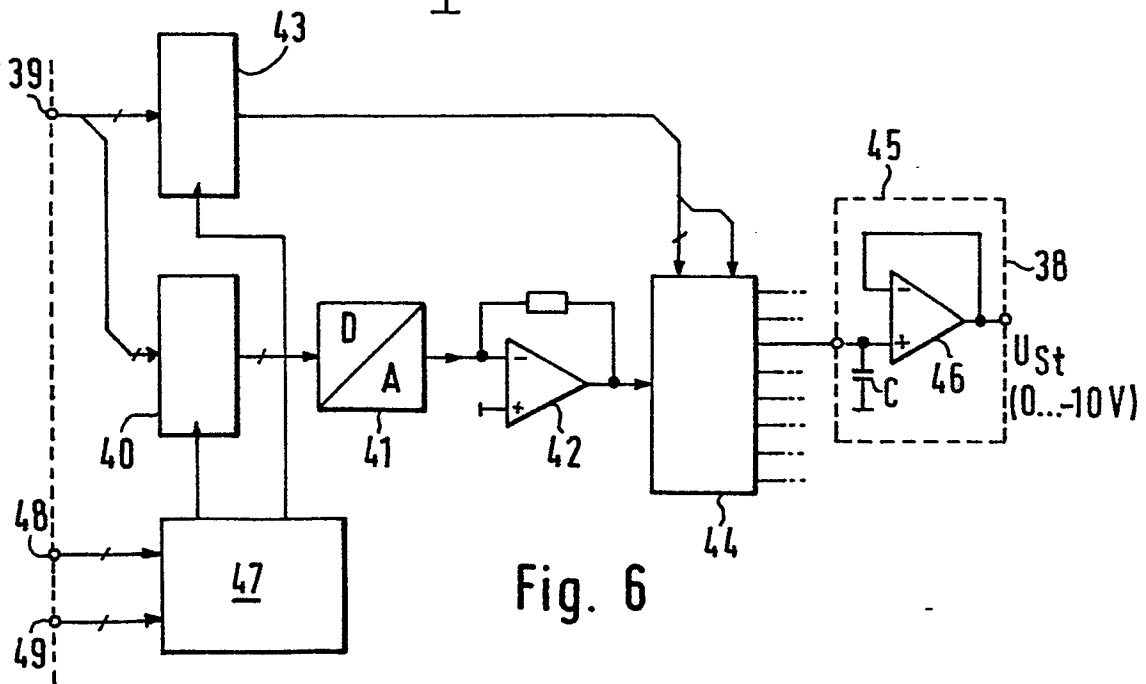


Fig. 6

5/5

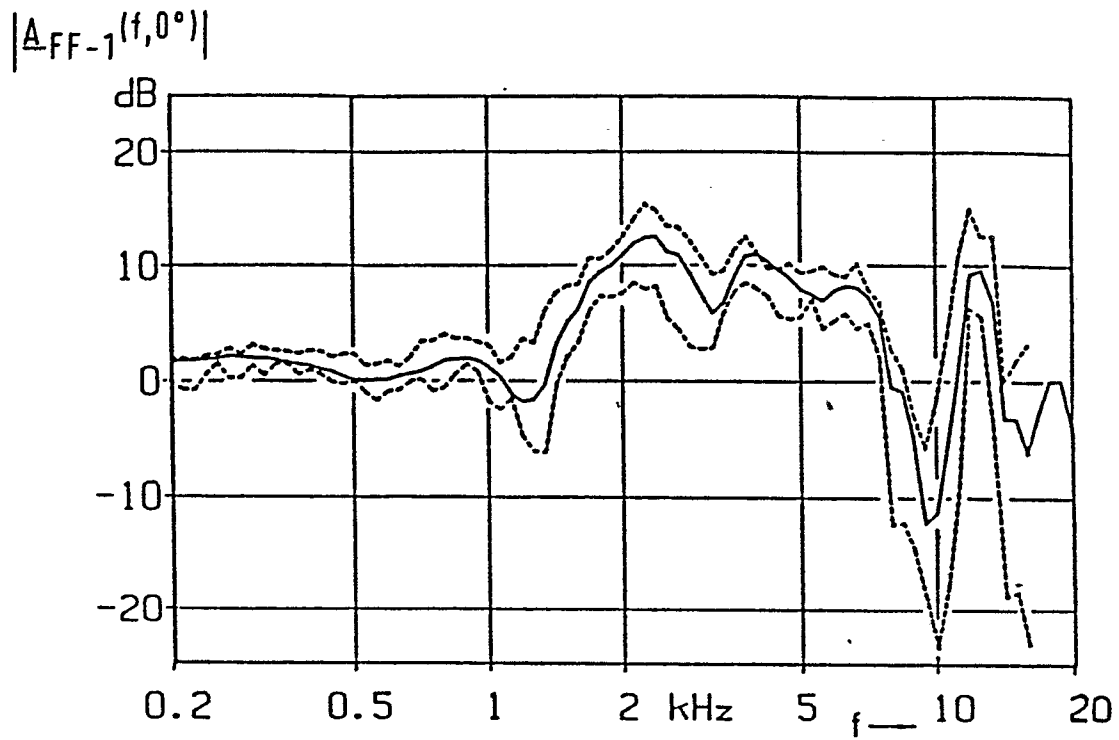


Fig. 7

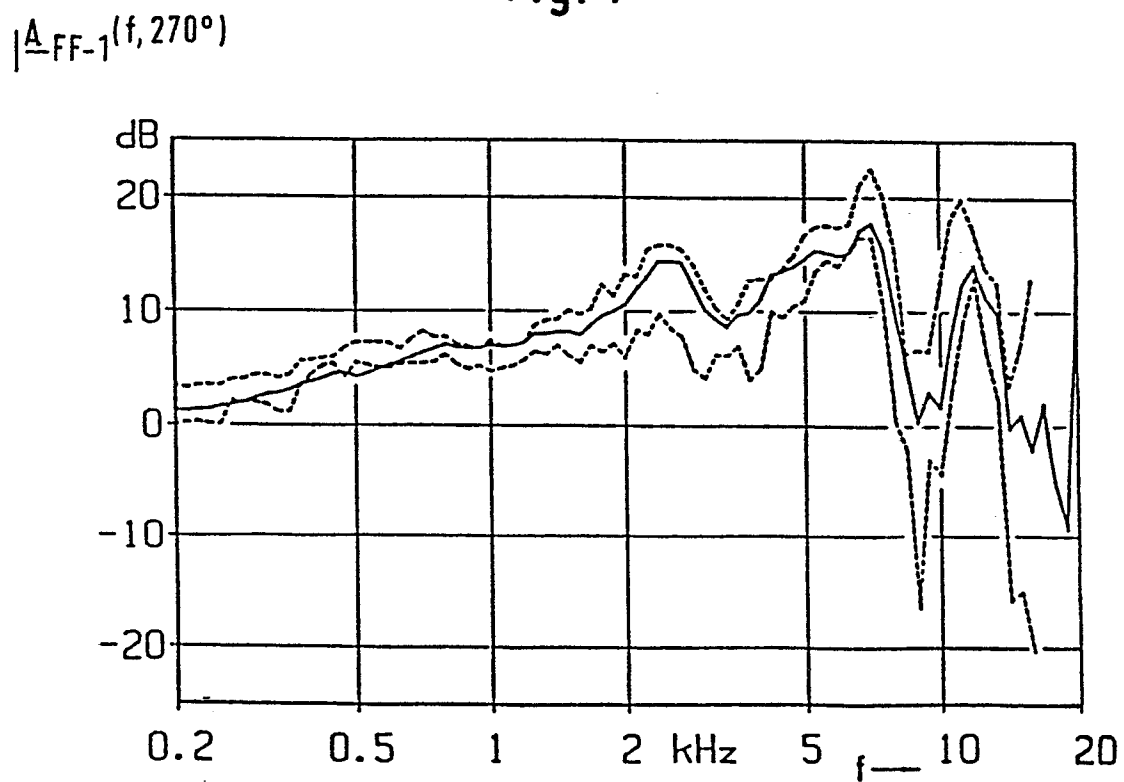


Fig. 8