



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
05.10.2011 Patentblatt 2011/40

(51) Int Cl.:
H04R 5/033 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **11156802.8**

(22) Anmeldetag: **03.03.2011**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME

(30) Priorität: **16.03.2010 DE 102010011603**

(71) Anmelder:
• **Deutsche Telekom AG**
53113 Bonn (DE)
• **Technische Universität Berlin**
10623 Berlin (DE)

(72) Erfinder:
• **Lindau, Alexander**
10437 Berlin (DE)
• **Schultz, Frank**
10435 Berlin-Mitte (DE)

(74) Vertreter: **2K Patentanwälte Blasberg Kewitz & Reichel**
Partnerschaft
Corneliusstraße 18
60325 Frankfurt am Main (DE)

(54) **Kopfhörer-Vorrichtung zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale und damit ausgestattetes System**

(57) Vorgeschlagen wird eine Kopfhörer-Vorrichtung (K) zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale sowie ein damit geschaffenes System. Die Kopfhörer-Vorrichtung weist zwei Koptbügelhälften (K) auf, an deren Enden jeweils ein elektrodynamischer Treiber (L) innerhalb eines akustisch bedämpften Gehäuses (A) angeordnet ist. Die jeweilige Koptbügelhälfte (KH) weist einen Hohlraum (D) auf, der akustisch mit dem bedämpften Gehäuse (A) verbunden ist und für den elektrodynamischen Treiber (L) akustisch wirksam ist. Vorzugsweise ist der Hohlraum (D) mit akustischen Dämpfungsmitteln (DE) ausgestattet und aus einem thermoplastischen Kunststoff gefertigt, wobei die Größe des Hohlraumes beispielsweise 200 ml beträgt. Somit wird für den elektrodynamischen Treiber bzw. Miniaturlautsprecher (L) ein akustisch wirksamer Hohlraum von beachtlicher Größe geschaffen, so dass ein extraaurales Kopfhörersystem realisiert werden kann, bei dem unter anderen folgende, an sich widersprüchlich erscheinende Maßnahmen erzielt werden können: Zum einen die Minaturisierung des elektrodynamischen Treibers (L), um unter anderem den Schallfeldwiderstand vor dem Ohrkanal zu reduzieren; zum anderen eine möglichst große Dimensionierung des elektrodynamischen Treibers, um den an sich schwächeren Schalldruckfrequenzgang mittels Filterung ausgleichbar zu machen. Das vorgeschlagene System weist entsprechende schaltbare Filterstufen auf.

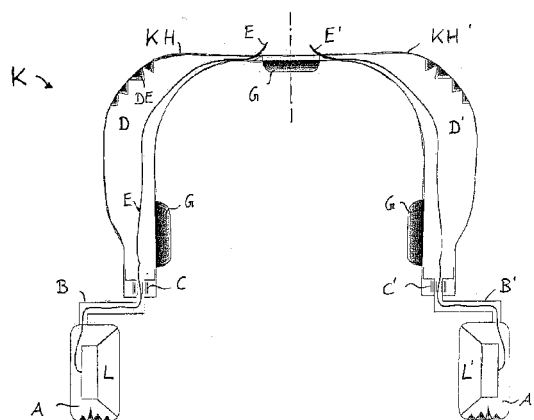


Fig. 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Kopfhörer-Vorrichtung zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie ein damit ausgestattetes System zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale gemäß dem Oberbegriff des nebengeordneten Anspruchs.

[0002] Die Realisierung plausibler oder gar authentischer virtueller akustischer Umgebungen ist seit längerer Zeit Ziel technischer Entwicklung im Bereich binauraler Audiosysteme. Die wesentlichen Eigenschaften und Kenngrößen des räumlichen Hörens werden hierbei durch richtungs- und frequenzabhängige Laufzeit- und Pegeldifferenzen bestimmt, die die Schallsignale einer Quelle beim Eintreffen an beiden Ohren bzw. Trommelfellen eines Hörers aufweisen (Duplextheorie des Hörens nach Lord Rayleigh). Man spricht dabei von der interauralen Laufzeitdifferenz (Englisch: "interaural time difference" - ITD) oder der interauralen Pegeldifferenz ("interaural level difference" - ILD). Eine vollständige, frequenzabhängige Beschreibung sowohl der zeitlichen als auch der spektralen Informationen des Schallfelds stellt die sog. kopfbezogene oder Außenohrübertragungsfunktion (HRTF: "head related transfer function") dar. Mittels dieser Übertragungsfunktionen kann man den akustischen Eindruck sog. virtueller Schallquellen mit hoher Plausibilität erzeugen. Filtert man ein beliebiges nachhallfreies, monophones Quellsignal mit den Außenohrübertragungsfunktionen des linken und rechten Ohres, stellt sich bei der Wiedergabe, z.B. über Kopfhörer, ein Schallereignis mit mehr oder minder korrektem Richtungs- und Entfernungseindruck (auch außerhalb des Kopfes!) ein. Ein solches Verfahren bezeichnet man im Allgemeinen als Auralisation. Den gleichen Eindruck nahezu realer Schallereignisse erzeugen Tonaufnahmen, die mit Mikrofonen erzielt werden, die im Ohr platziert werden, sog. Im-Ohr-Mikrofonen (im Englischen auch "real head recordings" genannt) oder die mit sog. Kunstkopfmikrofonen erzielt werden ("artificial head recordings"). Dabei wird die Filterung der Signale einer akustischen Szene mit Außenohrübertragungsfunktionen durch die jeweilige individuelle Kopf- und Ohrform bestimmt bzw. durch die spezielle Formgebung der Kunstkopfmikrofone, welche natürlichen menschlichen Köpfen mit detaillierten Außenohren nachempfundenen sind. Ein kopfbezogene (sog. "binaurale" bzw. "beidohrige"), räumliche Audiowiedergabe wird heute z.B. eingesetzt bei der kommerziellen computergestützten numerischen Akustiksimulation, in Computerspielen mit "Raumklang"-Unterstützung oder in Form binauraler Aufnahmen von Soundwalks oder Soundscapes für Dokumentations- oder Analysezwecke. Auch gibt es Bestrebungen, die binaurale, räumliche Audiowiedergabe in der Telekommunikation einzusetzen, z.B. in virtuell-räumliche Telekonferenzsystemen.

[0003] Als Wiedergabeverfahren binauraler, räumlicher Aufnahmen oder Simulationsergebnisse kann en-

tweder die sog. transaurale (nicht aufliegende) oder die kopfhörerbasierte (aufliegende) Technik zur Anwendung kommen. Die erstere erzielt die Übertragung der binauralen Ohrsignale durch Lautsprechersignale, die mit speziellen Verfahren so vorbehandelt wurden, dass jedes Ohr nur von den dafür vorbestimmten Schallanteilen erreicht wird (sog. dynamisch Übersprechkompensation). Der Einfachheit wegen werden jedoch oft kopfhörerbasierte Wiedergabeverfahren verwendet. Untersuchungen zur klanglichen Perfektionierung der binauralen Wiedergabe sind z.B. in dem Tagungs-Vortrag "Evaluation of Equalization Methods for Binaural Signals." von Schärer, Z. und Lindau, A. beschrieben (veröffentlicht auf der Tagung "126th AES Convention" in München 7-10 Mai 2009, und dokumentiert als Drucksache Nr. 7721).

[0004] Demnach ist bekannt, dass die Klangfarbenverfälschung, die sowohl auf der Aufnahmeseite wie auf der Wiedergabeseite auftritt, einen wesentlichen Qualitätsmangel darstellt und möglichst eliminiert werden sollte. Auf der Aufnahmeseite ist die Klangfarbenverfälschung im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die verwendeten Außenohrübertragungsfunktionen bzw. Kunstkopfmikrofone immer auf der Anthropometrie eines einzigen Individuums beruhen. Dadurch ergeben sich zwangsweise geometrische Abweichungen, die sich in individuell mehr oder weniger starken Frequenzgangverzerrungen der resultierenden Ohrübertragungsfunktionen äußern. Ein vorteilhafter Lösungsvorschlag wird in der früheren, noch nicht veröffentlichten Patentanmeldung DE 10 2010 004 171 vorgeschlagen.

[0005] Auf der Wiedergabeseite, mit deren Technologien sich die vorliegende Erfindung befasst, sind als wesentliche Ursachen von Klangfarbenverfälschungen die verwendeten Kopfhörer selbst zu nennen. Diese sind üblicherweise herstellerseitig mit bestimmten Frequenzgängen versehen ("Frei-" oder "Diffusfeldentzerrung"), welche dazu dienen, eine bessere klangfarbliche Vergleichbarkeit der Kopfhörerwiedergabe mit der von normalen stereophonen Lautsprechersignalen zu erreichen. Die Eignung konventioneller Kopfhörer zur binauralen Wiedergabe ist sehr beschränkt, da eine klanglich unverfärbte Reproduktion der kopfbezogenen Aufnahmen am Trommelfell bzw. am Ohrkanaleingang (offener oder geschlossener Ohrkanal) erreicht werden muss; also ein Kriterium, das aufgrund der vorgeschriebenen Schallfeldanpassungen übliche Kopfhörer nicht erfüllen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere folgende Probleme bekannt: Die Frequenzgänge verschiedener Kopfhörer, sei es zwischen Produkten verschiedener Hersteller oder zwischen verschiedenen Modeltypen eines Herstellers, können signifikant voneinander unterscheiden. Auch besteht eine intra-individuelle Varianz der Kopfhörer-Frequenzgänge (Frequenzgangsvariation beim wiederholten Aufsetzen) und eine interindividuelle Frequenzgangsvariation. Die herkömmlichen Systeme zeigen, in Abhängigkeit vom Prinzip der akustischen Ankopplung an das Ohr, eine mehr oder weniger starke Variabilität bzgl. des wiederholten Auf- und Absetzens.

Die schlechtesten Eigenschaften zeigen dabei die supraauralen (ohraufliegenden) Systeme, wenig besser verhalten sich circumaurale (ohrumschließende) Systeme, am Besten verhält sich ein 'extraaurales' Modell mit "frei vor dem Ohr schwebenden" Lautsprechern. Ein weiteres Problem der nicht-extraauralen Systeme ist das sog. leakage, bzw. der Leck-Betrieb. Dabei wirken sich kleine, bewegungs- oder aufsetzpositionsbedingte Undichtigkeiten an der Körperschlussstelle Polster-Ohr, bzw. Polster-Kopf in Form stark veränderter Tiefbassfrequenzgänge aus. Unter dem Begriff 'extraaural' wird die nahe Ohrbeschallung mit einem maximalen Ohr-Quellen-Abstand von etwa 0,5m verstanden bzw. auch jede "transaurale" Wiedergabe, die mit einem solchen Ohr-Quellen-Abstand durchgeführt wird.

[0006] Aufgrund der genannten Einschränkungen wird die geforderte Frequenzganglinearisierung bei den verfügbaren konventionellen Systemen bisher meist durch nachträgliches individuelles oder generisches Einmessen erreicht. Dazu werden Kompensationsfilter auf Basis empirischer Kopfhörer-Ohr-Übertragungsfunktion erstellt. Als ein allgemeiner Mangel der Kopflörerrückführung ist zudem die unplausible Wiedergabe sehr tiefer Frequenzen (< 100 Hz) bekannt. Trotz nominell identischer Frequenzgänge zeigt sich beim direkten Vergleich mit Lautsprechersystemen ein fühlbarer Unterschied bei der Reproduktion sehr tieffrequenter Signale, der auf eine mangelhafte Körperschallanregung bei der Wiedergabe mit Kopfhörern zurückführbar ist. Die genannten Mängel der herkömmlichen Systeme führen zu mehr oder minder starken, positions- und individuell bedingten Frequenzgangverzerrungen. Diese äußern sich besonders in einer Verfälschung der Klangfarbe, damit einhergehender verringerter Natürlichkeit und Lokalisationsfehlern v.a. in der Medianebene, z.B. in Form einer Verschlechterung der Vorne-Hinten-Diskrimination von Klangquellen. Im Stand der Technik finden sich lediglich mehrkanalige Kopfhörersysteme zur näherungsweise Darstellung von Surroundsignalen oder Systemen mit inhärenter Raumklangemulation. Wünschenswert sind neue Lösungen mit dem Ziel einer Verbesserung der bestehenden Kopflörertechnik unter dem expliziten Aspekt der optimalen Wiedergabe räumlicher, binauraler Signale.

[0007] Daher ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung eine Kopfhörer-Vorrichtung und ein damit ausgestattetes System vorzuschlagen, welche die oben genannten Nachteile überwinden. Insbesondere sollen die Kopfhörer-Vorrichtung und das System für die einfache und naturgetreue Wiedergabe räumlicher, kopfbezogener Audiosignale geeignet sein, ohne dass die oben genannten Einschränkungen konventioneller Kopfhörersysteme in Kauf genommen werden müssen.

[0008] Gelöst wird die Aufgabe durch eine Kopfhörer-Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie durch ein damit ausgestattetes System zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale mit den Merkmalen des nebengeordneten Anspruchs.

[0009] Demnach wird eine Kopfhörer-Vorrichtung mit einem Kopfbügel vorgeschlagen, der zwei Kopfbügelhälften aufweist, an deren Enden jeweils ein elektrodynamischer Treiber innerhalb eines akustisch bedämpften, geschlossenen Gehäuses angeordnet ist, wobei die jeweilige Kopfbügelhälfte einen Hohlraum aufweist, der akustisch mit dem bedämpften Gehäuse verbunden ist und für den elektrodynamischen Treiber akustisch wirksam ist.

[0010] Dadurch wird erreicht, dass in dem Kopfbügel des Kopfhörers selbst akustisch wirksame Hohlräume vorgesehen sind, die mit den beiden elektrodynamischen Treibern (z.B. Miniaturlautsprechern) räumlich verbunden sind und durch korrekte Abstimmung eine dem Treiber angepasste akustische Dämpfung ermöglichen. Dadurch kann ein extraaurales Kopfhörersystem realisiert werden, bei dem insbesondere die folgenden zwei Optimierungsmaßnahmen erzielt werden, die im Widerspruch zueinander stehen und daher nicht zusammen erreichbar erscheinen:

a) Eine Miniaturisierung der elektrodynamischen Treiber, um die frequenzabhängige Bündelung und das Aufbrechen in Partialschwingungen in möglichst hohe Frequenzbereich zu verschieben und um gleichzeitig den Schallfeldwiderstand aus Sicht des Ohrkanals zu reduzieren;

b) Eine möglichst große Dimensionierung von elektrodynamischem Treiber und akustisch wirksamem Gehäuse, um den bei extraauraler Bauweise bzw. Anordnung sich einstellenden schwächeren Tieffrequenzschalldruckfrequenzgang mittels Filterung ausgleichbar zu machen.

[0011] Eine gemeinsame Realisierung beider Maßnahmen a) und b) stellt an sich einen Widerspruch dar, denn die elektrodynamischen Treiber (Kopfhörer-Lautsprecher) können nicht klein und gleichzeitig groß dimensioniert werden. Gemäß der Erfindung wird jedoch ein miniaturisierter Treiber eingesetzt, dessen Funktion durch die Ausbildung von Hohlräumen im Kopfhörerbügel aufgewertet wird, so dass sich alle Vorteile der beiden Maßnahmen a) und b) ergeben und ausgenutzt werden können. Es hat sich gezeigt, dass durch das Vorsehen von Hohlräumen im Kopfbügel bzw. in dessen Bügelhälften relativ große Volumen von z.B. jeweils 200 ml realisiert werden können, so dass eine deutliche akustische Wirkung im Sinne der Maßnahme b) erreicht werden kann.

[0012] Der jeweilige Hohlraum wird bevorzugt mit passenden akustischen Dämpfungselementen ausgestattet. Der Kopfbügel oder zumindest die beiden Kopfbügelhälften sind vorzugsweise aus einem thermoplastischen Kunststoff gefertigt, wobei jeder Hohlraum möglichst kantenlos ausgestaltet ist. Vorteilhafterweise ist der jeweilige Hohlraum über ein verstellbares Verbindungselement mit dem bedämpften Gehäuse verbunden, in dem sich das elektrodynamische Treiber (elek-

troakustischer Wandler) befindet. Dabei kann das verstellbare Verbindungselement als ein hohlförmiges Winkelstück ausgebildet sein, das drehbeweglich an dem Ende der Kopfbügelhälfte montiert ist. Es kann vorgesehen sein, dass jeder der elektrodynamischen Treiber über ein Kabel mit einem elektrischen Audiosignal liefernden Verstärker verbindbar ist, wobei das Kabel durch den Hohlraum der jeweiligen Kopfbügelhälfte geführt ist. Dabei ist es vorteilhaft, wenn die Kabel am Scheitelpunkt des Kopfhörers aus den oberen Enden der Kopfhörerhälften herausgeführt sind. Zur Fixierung des Kopfhörers an einem menschlichen Kopf weist jede Kopfbügelhälfte vorzugsweise mindestens einen mechanisch dämpfenden Abstandshalter auf, der den Kopfbügel auf Abstand zum Kopf hält.

[0013] Das erfindungsgemäße System zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale ist mit mindestens einem Verstärker zur Ausgabe mindestens eines elektrischen Audiosignals für jeden binauralen Audiokanal versehen und mit der Kopfhörer-Vorrichtung verbindbar. Vorzugsweise weist das System eine Signalverarbeitungseinheit auf, die je einem Verstärker vorgeschaltet ist, um das elektrische Audio-Ausgangssignal aus einem Audio-Eingangssignal zu erzeugen, wobei die Signalverarbeitungseinheit mindestens zwei wahlweise aktivierbare Filterstufen aufweist. Insbesondere können die wahlweise aktivierbaren Filterstufen zumindest zwei der folgenden Filter umfassen:

- ein erstes Filter, das gemäß der Inversion einer individuellen Kopfhörer-AußenohrÜbertragungsfunktion ausgelegt ist,
- ein zweites Filter, das gemäß einer Inversion einer generischen Kopfhörer-AußenohrÜbertragungsfunktion ausgelegt ist,
- ein drittes Filter, das für eine Diffusfeldentzerrung ausgelegt ist, und/oder ein viertes Filter, das für eine Freifeldentzerrung ausgelegt ist.

[0014] Das System kann auch eine zuschaltbare Subwoofer-Vorrichtung aufweisen.

[0015] Diese und weitere Vorteile ergeben sich auch aus den Unteransprüchen.

[0016] Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen beschrieben, wobei auf die beiliegenden Zeichnungen Bezug genommen wird, die folgende schematische Darstellungen wiedergeben:

Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemäße Kopfhörer-Vorrichtung;

Fig. 2 zeigt ein erfindungsgemäßes System zum Anschluss der Kopfhörer-Vorrichtung nach Fig. 1.

[0017] In der Fig. 1 sind beide Kopfhörerhälften KH und KH' einer symmetrisch zur Spiegelachse aufgebauten Kopfhörer-Vorrichtung K dargestellt. Der mechanische Aufbau der Kopfhörer-Vorrichtung, im weiteren auch kurz Kopfhörer genannt, besteht also aus zwei spie-

gelbildlichen Hälften. Wie anhand der Fig. 1 zu sehen ist, weist eine jede Kopfbügelhälfte KH einen Hohlraum D auf, der akustisch wirksam verbunden ist mit dem jeweils am Bügelende angebrachten elektrodynamischen Treiber, der hier in Form eines Miniaturlautsprechers L als sog. 2-Zoll-Konustreiber realisiert ist. Der Miniaturlautsprecher L befindet sich in einem bedämpften Gehäuse A, das im oberen Bereich ein hohles Winkelstück B aufweist, welches als akustisches und mechanisches Verbindungselement dient und drehbeweglich über ein Gelenk C mit dem unteren Ende des Hohlraumes D verbunden ist. Durch Anbringen von Rastungen am Gelenk C ist eine stufenweise Veränderung der horizontalen Winkeleinstellung des Miniaturlautsprechers bzw. des Gehäuses A möglich, z.B. in 3 Stufen von -25°, 0°, 25°. Der Aufbau erfolgt durch Steckmontage am Kopfbügel.

[0018] Der mit dem Gehäuse A verbundene Hohlraum D bildet einen deutlich vergrößerten Resonanzraum, und damit ein deutlich vergrößertes akustisches Federvolumen für den jeweiligen Miniaturlautsprecher L aus. Im vorliegenden Beispiel wird ein Gesamtvolumen von etwa 200 ml realisiert. Das akustisch wirksame Kopfbügelvolumen endet kurz vor dem Scheitelpunkt des Bügels und wird dort zu einem massiven Steg. Das Gehäuse A ist zudem ohne scharfe, akustisch reflektierend wirkende Kanten ausgeführt, wodurch eine diffuse Streuung von zurück geworfenen Schallanteilen und damit eine weitere Verringerung des vom Ohrkanal aus sichtbaren Schallfeldwiderstands erreicht wird. Der Kopfhörerbügel ist aus einem thermoplastischen Material gefertigt. Hierzu können übliche thermoplastische Kunststoffe verwendet werden, wie z.B. Polypropylen, AcrylnitrilButadien-Styrol oder Polyamid.

[0019] Die Formgebung ist so gestaltet, dass der jeweilige Hohlraum D im Innern keine Kanten oder Ecken aufweist. Außerdem ist der Hohlraum D im Innern akustisch gedämpft, indem dort Dämpfungselemente DE angeordnet sind. Zur Fixierung an einem menschlichen Kopf (nicht dargestellt) sind mehrere elastische Abstandshalter G vorgesehen, die für eine Verringerung der mechanischen Belastung des Kopfes sorgen sollen. Die Länge des Abstandshalters B kann durch geeignete Messungen nach an sich bekannten Verfahren unter der Prämisse der Minimierung des Schallfeldwiderstands dimensioniert werden und beträgt etwa 1 bis 10 cm.

[0020] Die Kabelführung des Kabels E erfolgt durch den Hohlraum D und durch die verbundenen hohlen Bauteile B und A hindurch bis zum Miniaturlautsprecher L. Das Austrittsloch des Kabels E befindet sich zentral am oberen Kopfbügel bzw. mittig im Scheitel des Kopfbügels. Dort kann eine Durchgangsbohrung vorgesehen sein, die auch zur Befestigung von Kopfbewegungs-Sensoren (Headtracking-Sensoren) oder zur festen Verbindung mit HMDs (Head-Mounted Displays) dient. Soweit also räumliche Audiowiedergabe im Zusammenhang mit multimodalen, z.B. audiovisuellen virtual reality Systemen Verwendung findet, wird hier auch bei der konstruktiven Ausgestaltung bzw. dem Design (z.B. der Kopfbü-

gel) auf leichte Kombinierbarkeit mit handelsüblichen HMDs und Sensorik (head tracking) zur Positionsverfolgung des Benutzers Wert gelegt.

[0021] Der in der Fig. 1 dargestellte Kopfhörer K erfüllt die Anforderungen eines extraauralen Kopfhörersystems, welches aufgrund der frei vor dem Ohr angebrachten elektrodynamischen Treibern (hier die Lautsprecherkapseln L und L') die eingangs genannten Probleme vorteilhaft löst. Die Bestückung mit passenden elektrodynamischen Treibern ist von besonderer Bedeutung. Hierfür besteht einerseits die Zielsetzung, dass die Dimensionierung sehr klein sein muss, um frequenzabhängige Bündelung und das Aufbrechen in Partialschwingung in möglichst hochfrequente Bereiche zu verschieben und gleichzeitig den Schallfeldwiderstand aus Sicht des Ohrkanals zu reduzieren. Andererseits besteht die Zielsetzung, dass die Dimensionierung der elektrodynamischen Treiber möglichst groß sein sollte, um den bei extraauraler Bauweise schwächeren tieffrequenten Schalldruckfrequenzgang (bei trotzdem ausreichenden, unverzerrten Schalldruckpegel auch bei größeren Ohrabständen) mit Filterung ausgleichbar zu machen. Beide zueinander widersprüchlichen Zielsetzungen können dennoch aufgrund der hier vorgeschlagenen Bauweise erreicht werden.

[0022] Mit Hilfe einer anhand der Fig. 2 noch näher beschriebenen aktiven elektrischen Entzerrung kann eine akustische Signalbandbreite von 50 Hz - 16 kHz erzielt werden und kann damit - bis auf den sehr tieffrequenten Bereich (ca. 20 - 50 Hz) - der volle Hörbereich frequenzganglinear am Ohr erzeugt werden. Somit wird hier die bei frei aufgehängten Kopfhörerkapseln üblicherweise reduzierte Tiefbasswiedergabe überwunden.

[0023] Das in der Fig. 2 dargestellte System erzeugt für den zuvor beschriebenen Kopfhörer ein Audio-Ausgangssignal OUT, so dass mehrere nachfolgend noch genauer beschriebene Frequenzgangziele erreicht werden. In der Fig. 2 ist zur Vereinfachung die Schaltung für nur einen Audio-Kanal dargestellt.

[0024] Das System enthält eine Signalverarbeitungseinheit SV, die mit einem Audio-Eingangssignal IN gespeist wird und mehrere aktivierbare Entzerrer EQ1 bis EQ4 aufweist, denen ein Verstärker AMP nachgeschaltet ist, der schließlich das gewünschte Audio-Ausgangssignal an den Kopfhörer abgibt. Zusätzlich enthält das System noch einen zuschaltbaren Subwoofer SWF, der zur optionalen Erzeugung tieffrequenter Signale mit einem Tiefpass TP, einem Verstärker AMP* und einem Lautsprecher LS* ausgestattet ist.

[0025] Die Aktivierung der Entzerrer und des Subwoofers erfolgt über entsprechende Schalter S und S* bzw. Schaltungen, die auch Software realisiert sein können. In dem hier dargestellten Beispiel werden die folgenden vier Aktivierungsoptionen realisiert, die jeweils einem bestimmten Frequenzgangziel dienen:

[0026] Das erstere Frequenzgangziel hat den Anspruch einer höchsten erreichbaren Qualitätsstufe und basiert auf der Schallwiedergabe mit linearem Frequenz-

gang am Ohrkanaleingang unter Vernachlässigung von Außenohreinflüssen. Hierzu befindet sich der Schalter S in der ersten Position "1", wodurch das Eingangssignal IN zunächst auf einen individuellen Entzerrer IEQ geführt wird und dann über einen Hochpass auf den Entzerrer EQ1 geführt wird. Der individuelle Entzerrer IEQ ist durch ein Einmessen auf die persönliche Ohrübeiragungsfunktion konfiguriert und stellt somit ein persönliches Filter (Realisierung z.B. durch analoge oder digitale IIR- oder FIR-Filter) dar. Das Filter kann also verschieden realisiert und den Audiosignalen auf verschiedene Weise hinzugefügt werden, z.B. durch Vorfilterung der Signale mit geeigneter Software, oder durch eine - als Zusatzausstattung - dem Kopfhörer vorzuschaltende Echtzeitfilterbank (z.B. FIR-Filterung). Das vorgefilterte Signal wird dann dem ersten Equalizer EQ1 (Sphere Flat) zugeführt und anschließend im Verstärker AMP verstärkt bevor es aus Ausgangssignal OUT an den Kopfhörer K (s. Fig. 1) abgegeben wird.

[0027] Das zweite Frequenzgangziel wird in der Schalterposition "2" erreicht und basiert auf einer generischen Inversion der Kopfhörer-Außenohrübertragungstrecke und macht den Kopfhörer ad hoc (ohne weiteres Zubehör oder weitere Vorverarbeitung der Signale) für ein breites Publikum zur räumlichen Audiowiedergabe, wenn auch unter Beibehaltung von Anteilen der o. g. interindividuellen Frequenzgangvariationen, nutzbar. Somit ergibt sich die Übertragungsfunktion des zweiten Entzerrers EQ2 aus einer generischen Inversion, d.h. aus Reihenmessungen an mehreren Personen mit dem Kopfhörer-System im ersten Frequenzgangzustand.

[0028] In diesen beiden Betriebszuständen (Schalterpositionen "1" und "2") sollte vorzugsweise der Tieftonfrequenzgang unterhalb der unteren Eckfrequenz des Kopfhörersystems (< 90 Hz) durch Einkopplung des Subwoofers SWF mit regelbarer Übernahmefrequenz und Pegel realisiert werden. Dazu wird der Schalter S* aktiviert. Auf diese Weise wird das Problem der bei Kopfhörerr wiedergabe räumlicher Signale an sich auftretenden mangelhaften Tiefbasswiedergabe und Körperschallanregung eliminiert.

[0029] Als weitere vorteilhafte Entzerrungsziele sind folgende zu nennen: Als drittes Ziel soll eine Diffusfeld-Entzerrung durchgeführt werden. Dies geschieht in der Schalterposition "3", also durch Aktivieren des dritten Entzerrers EQ3. Als viertes Ziel soll eine Freifeld-Entzerrung erfolgen. Dies geschieht unter Aktivieren des vierten Entzerrers EQ4. Beide Entzerrer bzw. Filter lassen sich aus der Differenz der jeweiligen Schallfeldanpassung zur generischen Kopfmörembertragungsfunktion bestimmen. In diesem Betriebszustand kann das dargestellte System auch wie ein herkömmlicher Kopfhörer betrieben werden, wodurch ein - aus Kompatibilitätsgründen - alt hergebrachtes Zweitsystem dann nicht mehr benötigt wird. Außerdem kann auch auf den Subwoofer SWF verzichtet werden.

[0030] Zum elektrischen Aufbau des in der Fig. 2 gezeigten System ist außerdem zu folgendes zu sagen: In

dem dargestellten Beispiel wird zum Betrieb des Kopfhörers ein 2-kanaliger Kopfhörerverstärker AMP (60 W RMS-Leistung an 4 Ohm Last) mit vier schaltbaren aktiven Filtersets (s. EQ1 bis EQ4) eingesetzt. In Filterstellung bzw. Schalterposition "1" erzielt der Kopfhörer in einem Abstand von 1-10 cm an einem bündig in einer schallharten Kugel ($\varnothing$ 18 cm) eingelassenen Mikrofon einen von 50 Hz - 16 kHz reichenden, linearen Frequenzgang (daher die Bezeichnung "sphere flat"-EQ). In Filterstellung "2" wird ein generisches Filter zur Kompensation der Kopfhörer-Außenohrübertragungsstrecke realisiert. Aufgrund der tieffrequenten Auskopplung des Kopfhörers mit einer verbreiteten und gutmütigen Hochpassfilterung von 24dB/Oktave Flankensteilheit bei 90 Hz kann in diesem Fall nahezu jeder handelsübliche Subwoofer mit regelbarer Grenzfrequenz und Lautstärke zur Ergänzung des tieffrequenten Frequenzgangs eingesetzt werden. In den Filterstellungen "3" und "4" ist es möglich, den Kopfhörer als herkömmliches System zur Wiedergabe von lautsprechstereofonen Signalen zu betreiben (dazu Filter III = Diffusfeldentzerrung, Filter IV = Freifeldentzerrung). Dabei ist die untere Grenzfrequenz zum Betrieb ohne Subwoofer durch aktive Filterung auf mindestens 70 Hz abzusenken. Die notwendigen Filterkurven werden aus der Differenz der generischen Kopfhörerübertragungsfunktion und den jeweiligen, einschlägig tabellierten Schallfeldanpassungen bestimmt.

[0031] Nachfolgend werden nach Art einer systematischen Übersicht der wesentlichsten Einflüsse, die bei der Wiedergabe räumlicher, binauraler Signale mit Kopfhörern zu Klangfarbenverfälschungen führen, und den Beitrag, den das hier vorgestellte System zu deren Verbesserung liefert, zusammenfassend beschrieben. Insbesondere werden hier die wesentlichen Vorteile bzw. Alleinstellungsmerkmale des Systems noch einmal überblicksartig zusammengefasst:

[0032] In Filterstellung "1" fällt die bisher übliche individuelle oder generische Entzerrung des Systems auf Basis von Einmessungen leichter, da weder Frei- noch Diffusfeldentzerrungen rückgängig gemacht werden muss. Zudem ist die wahre individuelle Ohrübertragungsfunktion mit einem nach Filter EQ1 entzerrten System zum ersten Mal ohne Konfundierung mit Kopfhörereigenschaften bestimmbar. In Filterstellung "2" ist das System sofort und ohne weitere Signalkonditionierung zur Wiedergabe binauraler Signale einsetzbar. Zum Erreichen der vollen Audiobandbreite kann ein handelsüblicher Subwoofer SWF eingesetzt werden. Dessen Ankopplung wird durch das extraaurale Design stark erleichtert und führt zu einer wesentlich erhöhten Natürlichkeit des Hörerlebnisses von z.B. binauralen Computerspielsoundtracks, Kinofilmen, Pop/Rockmusik oder klassischen Konzerten. Das extraaurale Design ermöglicht das Erzielen einer optimalen akustischen Belastung des Ohrkanalausgangs, wie es z.B. mit *in-ear* Kopfhörern transportabler MP3-Player oder mit geschlossenen Kopfhörern gar nicht, und mit offenen, circumauralen Systemen (wie z.B. den im *virtual reality* Bereich weit ver-

breiteten Systemen) nur in Grenzen möglich ist. Zudem führt das extraaurale Design zu einer Minimierung der intraindividuellen Frequenzgangvarianz und schließt die *leakage*-Problematik gänzlich aus. Dabei ist das neue System im Subwooferbetrieb breitbandiger als auf dem Markt befindliche offene Studiokopfhörersysteme. Im Filterzustand "3" bzw. "4" ersetzt es den standardisierten Studiokopfhörer, wobei bei vielen bekannten Systemen bei von einer tatsächlich standardisierten Wiedergabekurve bisher gar nicht die Rede sein kann. Mit diesen Eigenschaften wird auf die Positionierung des Systems als Referenzverfahren für Nutzer in den - nach Einschätzung der Autoren zunehmen konvergierenden und expandierenden - Bereichen a) herkömmlicher und b) räumlicher Audioproduktion und -rezeption abgezielt.

[0033] Was das Problem der *inter*-individuellen Varianz von Kopfhöreraußenohrübertragungsfunktionen (d.h. der Varianz zw. verschiedenen Personen) angeht, so kommt es üblicherweise zu einer Verfärbung bei Kompensation mit einer generischen, d.h. einer aus der Mittelung mehrerer individueller Messungen erstellten Kopfmöreraußenohrübertragungsfunktion. Aufgrund der als "sphere flat" bezeichneten Grundentzerrung, erlaubt das hier vorgestellte System erstmals eine vom kopfhörereigenen Frequenzgang unabhängige Untersuchung bzw. Erhebung individueller Kopfhöreraußenohrübertragungsfunktionen. Es konnten folgende Abweichungen zum generischen Wert (d.h. zum Mittelwert) festgestellt werden: 50-200 Hz ± 3 dB aufgrund der *leakage*-Problematik, von 200 Hz bis 2 kHz geringe Unterschiede, von 2 bis 6 kHz Unterschiede bis ± 3 dB ipsilateral bzw. ± 6 dB contralateral. Oberhalb 6kHz werden die Abweichungen zunehmend größer. Die wesentlichen Vorteile einer generischen Inversion liegen in der Halbierung der maximalen interindividuellen Fehlerausprägungen sowie in der hörerübergreifenden Annäherung an ein gewünschtes Frequenzgangsziel.

[0034] Was das Problem der *intra*-individuellen Varianz von Kopfhöreraußenohrübertragungsfunktionen (d.h. der Varianz der Übertragungsfunktion für eine einzelne Person, z.B. durch wiederholtes Aufsetzen) angeht, so kommt es normalerweise zur Verfärbung bei Kompensation mit nicht-individuellen Kopfhöreraußenohrübertragungsfunktionen. Die intra-individuelle Frequenzgangvarianz von Kopfhörern führt zur Verfärbung bei Kompensation mit hochgenauen individuellen, jedoch positionsspezifischen Kompensationsfiltern. Eine Bestimmung und Kompensation der generischen Naitfeldaußenohrübertragungsfunktion ist mit dem beschriebenen System erstmals möglich. Es konnten folgende Ausprägungen intraindividuelle Varianz festgestellt bzw. erstmals abgeschätzt werden: 50-200 Hz ± 3 dB ("*leakage*"-Problematik), 200-3 kHz überwiegend geringer als ± 1 dB, 3 bis 6 kHz (vor erster Außenohrresonanz) ± 3 dB, oberhalb 6 kHz individuell sehr verschieden, maximal +10dB bis -25dB ("*notch*"-Problematik), bei einzelnen Personen jedoch auch nur ± 3 dB. Das System schafft hier zudem eine deutliche Reduzierung

der Varianz durch sein extraaurales Design

[0035] Bezüglich der Frequenzgangziele "standardisiert frei- bzw. diffusfeldentzerrter Kopfhörer" ist zu sagen, dass herstellerbedingte Unterschiede von bis zu $\pm 20\text{dB}$ festgestellt werden konnten. Bezogen auf eine generische Kopfhöreraußenohrübertragungsfunktion kann das System eine vollständige Eliminierung von Klangverfärbungen, d.h. eine über eine Gruppe von Personen im Mittel fehlerfreie frei- oder diffusfeldentzerrte Wiedergabe erreichen. Die auftretende Frequenzgangvarianz "standardisierter Kopfhörer" über Hersteller und über Modelle kann also durch das erfindungsgemäße Systeme vollständig eliminiert werden.

[0036] Zur "Beschränkten Tiefbasswiedergabe" ist zu sagen, dass bei herkömmlichen Systemen im Vergleich mit der Realität der Eindruck eines mangelhaften Tiefbasses entsteht. Dies wird hier durch optionalen Einsatz eines Subwoofer gelöst.

[0037] Mit der hier vorgeschlagenen Konstruktion einer Kopfhörer-Vorrichtung (Fig. 1) und eines Systems (Fig. 2) zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale ist es möglich, einen miniaturisierten elektrodynamischen Treiber bzw. Miniaturlautsprecher einzusetzen, so dass der Schallfeldwiderstand vor dem Ohrkanal möglichst reduziert ist und frequenzabhängige Bündelungen und das Aufbrechen in Partialschwingungen in möglichst hohe Frequenzbereiche verschoben werden. Durch die Schaffung des akustisch an den elektrodynamischen Treiber angekoppelten Hohlraumes D innerhalb der Kopfhörerbügelhälfte KH (s. Fig. 1) stellt sich der miniaturisierte elektrodynamische Treiber akustisch wirksam als ein hinreichend groß dimensionierter Treiber dar, was es wiederum ermöglicht, den an sich bei extraauraler Bauweise bzw. Anordnung sich einstellenden schwächeren Schalldruckfrequenzgang nun mittels Filterung effektiv ausgleichen zu können. Durch den Einsatz entsprechender Filter und durch wahlweises Einschalten verschiedener Filterstufen (s. Fig. 2) ist ein Optimierungssystem für den jeweils vorgesehenen Anwendungsbereich erzielbar. Insbesondere wird ein generisches Filter EQ2 zur Kompensation der Kopfhöreraußenohrübertragungsstrecke eingesetzt (Schalterstellung "2"), wobei zusätzlich ein Subwoofer mit regelbarer Grenzfrequenz und Lautstärke zum Einsatz kommt, um den tieffrequenten Frequenzgang darzustellen, den der Kopfhörer an sich nicht leisten kann. In einer anderen Variante (Filterstellung "1") wird durch Einmessen auf die persönliche Ohrübertragungsfunktion ein persönliches Filter IEQ definiert und eingesetzt, so dass eine sehr hohe Qualitätsstufe der Schallwiedergabe mit linearen Frequenzgang am Ohrkanaleingang unter gleichzeitiger Kompensation verfälschender Außenohreinflüssen erzielt werden kann. Auch in diesem Falle ist es von Vorteil, wenn ein Subwoofer zugeschaltet wird.

[0038] Wahlweise kann auch ein drittes Filter EQ3 zum Einsatz kommen, welches für eine Diffusfeldentzerrung sorgt. Alternativ kann auch ein Filter EQ4 zur Freifeldentzerrung eingesetzt werden. Durch Absenkung der un-

teren Eckfrequenz auf beispielsweise 70 Hertz, welches durch weitere aktive Filterung möglich ist, kann auf den Einsatz auf den Subwoofer hier verzichtet werden.

[0039] In der Filterstellung "1" ("sphere flat"-Entzerrung) ist das System insbesondere dazu geeignet, eine individuelle Entzerrung einzustellen.

[0040] In Filterstellung "2" (generische Entzerrung) ist das System insbesondere dazu geeignet, sofort und ohne weiteres als binaurales Wiedergabesystem eingesetzt zu werden, beispielsweise im Bereich der Wiedergabe von Computerspielen, Soundtracks, vielen Kinofilmen, Pop- oder Rockmusik oder klassischen Konzerten. Dabei wird die sogenannte Leakage-Problematik gänzlich ausgeschlossen. Zudem ist das System im Subwoofer-Bereich deutlich breitbandiger ausführbar als dies von üblichen Kopfhörersystemen bekannt ist.

[0041] In der Filterstellung "3" bzw. "4" kann eine der Wiedergabe mit herkömmlichen Studiokopfhörer ähnliche Schallreproduktion realisiert werden.

[0042] Die Erfindung schafft eine wesentliche Verbesserung aller bisher existierenden Anwendungen mit räumlicher, binauraler, d. h. auf Ohrsignalen beruhender Audiowiedergabe. Dazu zählen z.B. binaurale Raumakustiksimulationen, 3D Virtual Auditory Displays im Allgemeinen, räumliche Akustik in Computerspielen, virtuelle Chaträume, binaurale Guidance & Alerting Systeme, binaurale walkthroughs z.B. durch virtuelle Architektur, Ausstellungen oder in multimodalen Mediashow, Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen sowie alle zukünftig denkbaren rich-media Anwendungen mit binauraler, räumlicher Audiowiedergabe wie z.B. binaurales Teleconferencing via VoIP oder binaurales Streaming von Livekonzerten. Für alle diese Anwendungen ist das vorgestellte System als standardisiertes Endgerät denkbar. Aufgrund seiner Eigenschaften wird auf die Positionierung des Systems als Referenzwiedergabeverfahren für Nutzer in den Bereichen herkömmliche und räumliche Audioproduktion und -rezeption abgezielt.

Patentansprüche

1. Kopfhörer-Vorrichtung (K) zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale mit einem Kopfbügel, der zwei Kopfbügelhälften (KH, KH') aufweist, an deren Enden jeweils ein elektrodynamischer Treiber (L, L') innerhalb eines akustisch bedämpften Gehäuses (A, A') angeordnet ist,
dadurch gekennzeichnet, dass
die jeweilige Kopfbügelhälfte (KH) einen Hohlraum (D) aufweist, der akustisch mit dem bedämpften Gehäuse (A) verbunden ist und für den elektrodynamischen Treiber (L) akustisch wirksam ist.
2. Kopfhörer-Vorrichtung (K) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Hohlraum (D) mit akustischen Dämpfungselementen (DE) ausgestattet ist.

3. Kopfhörer-Vorrichtung (K) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** jede Kopfbügelhälfte (KH) aus einem thermoplastischen Kunststoff gefertigt ist.
4. Kopfhörer-Vorrichtung (K) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Gehäuse (A) kantenlos ausgebildet ist.
5. Kopfhörer-Vorrichtung (K) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Hohlraum (D) über ein verstellbares Verbindungselement (B) mit dem bedämpften Gehäuse (A) verbunden ist.
6. Kopfhörer-Vorrichtung (K) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das verstellbare Verbindungselement als ein hohlförmiges Winkelstück (B) ausgebildet ist, das drehbeweglich an dem Ende der Kopfbügelhälfte (KH) montiert ist.
7. Kopfhörer-Vorrichtung (K) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder der elektrodynamischen Treiber (L) über ein Kabel (E) mit einem elektrischen Audio-Ausgangssignal (OUT) liefernden Verstärker (AMP) verbindbar ist, wobei das Kabel (E) durch den Hohlraum (D) der jeweiligen Kopfbügelhälfte (KH) geführt ist.
8. Kopfhörer-Vorrichtung (K) nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Kabel (E) am Scheitelpunkt des Kopfhörers aus den oberen Enden der Kopfhörerhälften (KR) herausgeführt sind.
9. Kopfhörer-Vorrichtung (K) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Fixierung des Kopfhörers (K) an einem menschlichen Kopf jede Kopfbügelhälfte (KH) mindestens einen mechanisch dämpfenden Abstandhalter (G) aufweist, der den Kopfbügel auf Abstand zum Kopf hält.
10. System zur Wiedergabe binauraler räumlicher Audiosignale mit mindestens einem Verstärker (AMP) zur Ausgabe mindestens eines elektrischen Audio-Ausgangssignals (OUT) für jeden Stereokanal und mit einer daran angeschlossenen einer Kopfhörer-Vorrichtung (K), die einen Kopfbügel mit zwei Kopfbügelhälften (KH, KH') aufweist, an deren Enden jeweils ein elektrodynamischer Treiber (L, L') innerhalb eines akustisch bedämpften Gehäuses (A, A') angeordnet ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** die jeweilige Kopfbügelhälfte (KH) einen Hohlraum (D) aufweist, der akustisch mit dem bedämpften Gehäuse (A) verbunden ist und für den elektrodynamischen Treiber (L) akustisch wirksam ist.
11. System nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder elektrodynamische Treiber (L) über ein Kabel (E) mit dem elektrischen Audio-Ausgangssignal (OUT) liefernden Verstärker (AMP) verbindbar ist, wobei das Kabel (E) durch den Hohlraum (D) der jeweiligen Kopfbügelhälfte (KH) geführt ist.
12. System nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** das System eine Signalverarbeitungseinheit (SV) aufweist, die dem mindestens einen Verstärker (AMP) vorgeschaltet ist, um das elektrische Audio-Ausgangssignal (OUT) aus einem Audio-Eingangssignal (IN) zu erzeugen, wobei die Signalverarbeitungseinheit (SV) mindestens zwei wahlweise aktivierbare Filterstufen (EQ1...EQ4) aufweist.
13. System nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die wahlweise aktivierbaren Filterstufen zumindest zwei der folgenden Filter umfassen:

ein erstes Filter (EQ1), das gemäß der Inversion einer individuellen Kopfhöreraußenohrübertragungsfunktion ausgelegt ist,

ein zweites Filter (EQ2), das gemäß der Inversion einer generischen Kopfhöreraußenohrübertragungsstrecke ausgelegt ist,

ein drittes Filter (EQ3), das für eine Diffusfeldentzerrung ausgelegt ist, und/oder ein viertes Filter (EQ4), das für eine Freifeldentzerrung ausgelegt ist.
14. System nach einem der Ansprüche 10 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** das System eine zuschaltbare Subwoofer-Vorrichtung (SWF) aufweist.
15. System nach einem der Ansprüche 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zuschaltbare Subwoofer-Vorrichtung (SWF) mit einer Pegelregelung und/oder eines, insbesondere im Bereich von 50-200Hz, regelbaren Tiefpassfilters zur Einstellung der Übernahmefrequenz zum Kopfhörersystem ausgestattet ist.

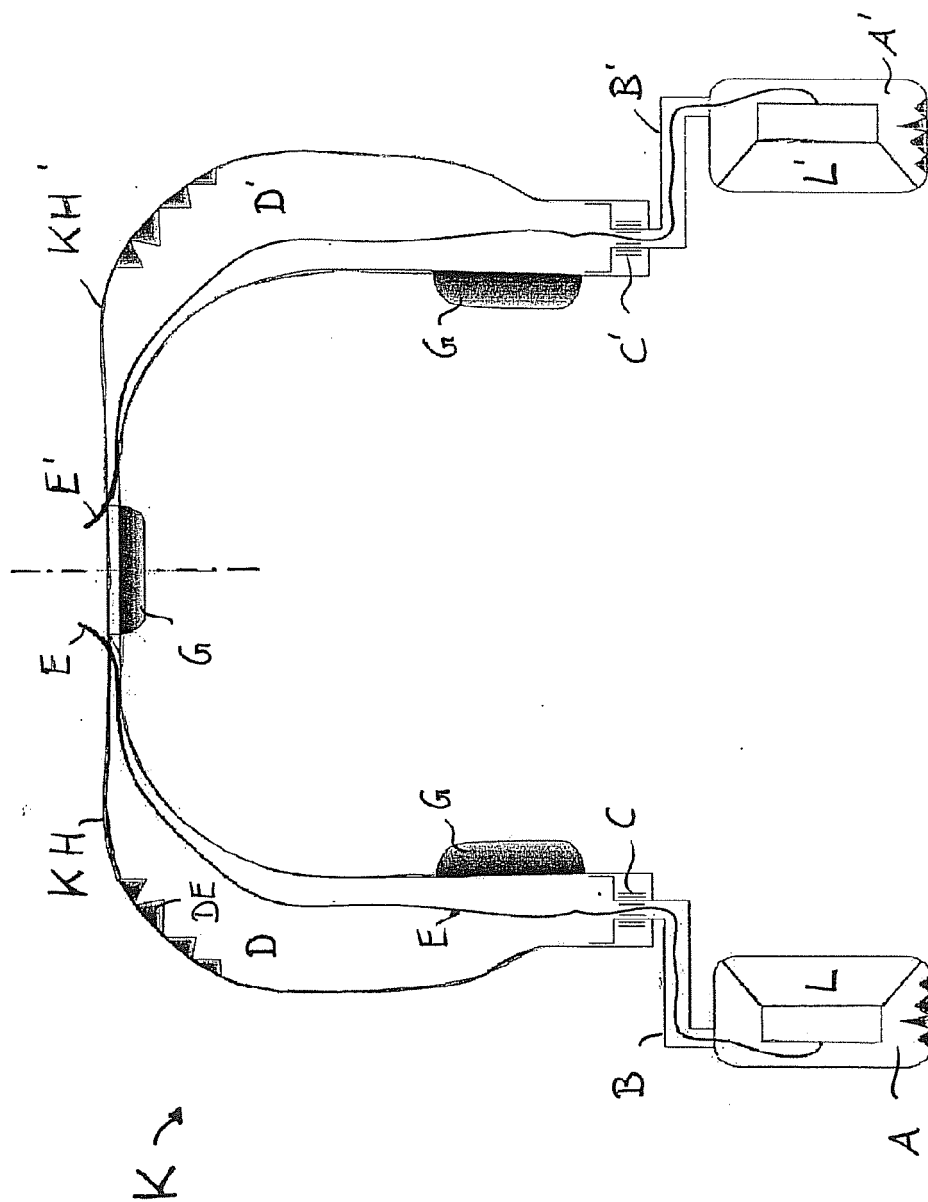


Fig. 1

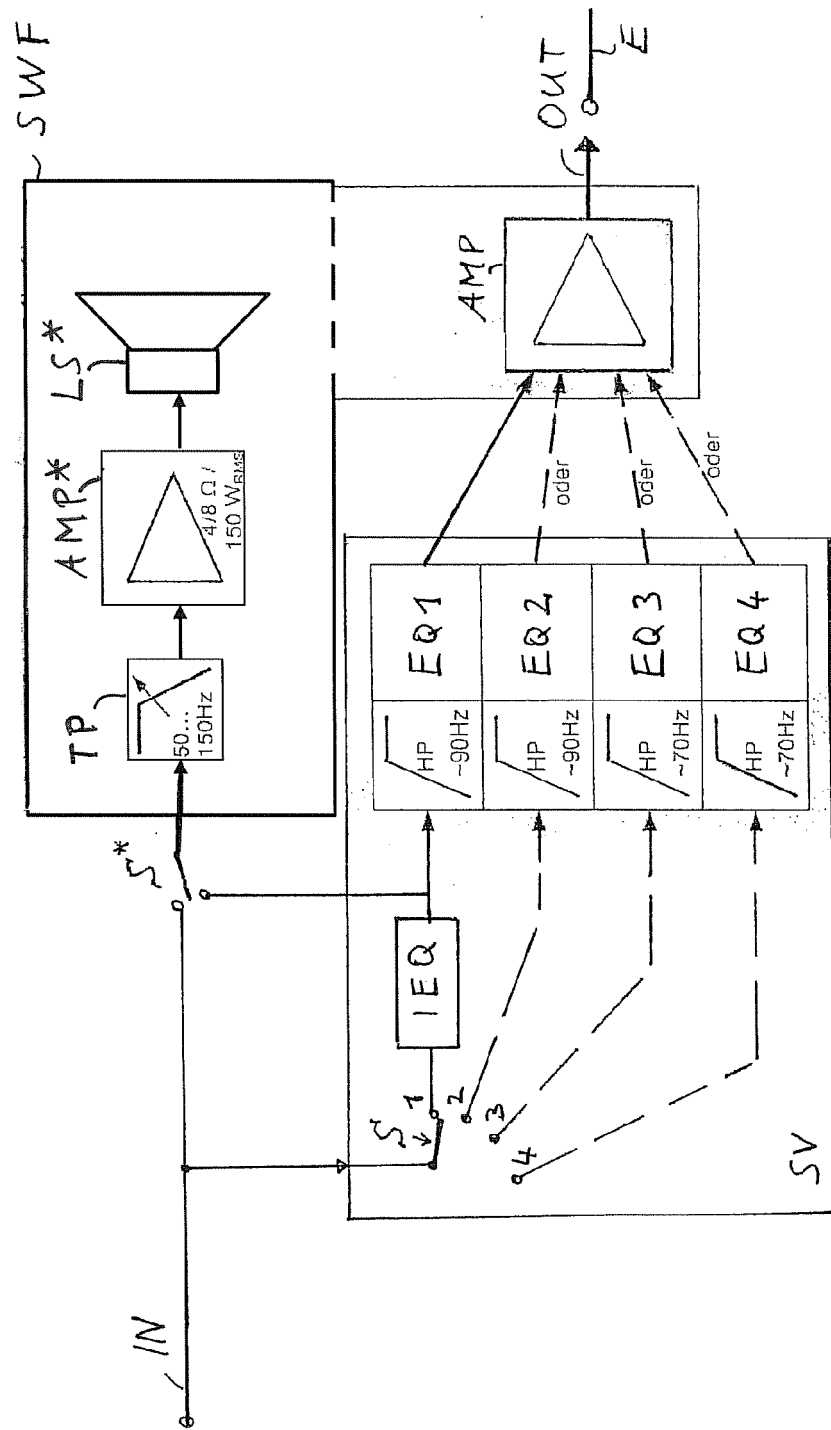


Fig. 2

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102010004171 [0004]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **SCHÄRER, Z. ; LINDAU, A.** Evaluation of Equalization Methods for Binaural Signals. *126th AES Convention*, 07. Mai 2009 [0003]