



(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43)

Veröffentlichungstag:
30.10.2024 Patentblatt 2024/44

(51)

Internationale Patentklassifikation (IPC):
H04R 1/10 (2006.01) G10K 11/178 (2006.01)
G10L 21/0208 (2013.01) H04R 25/00 (2006.01)

(21)

Anmeldenummer: 24161546.7

(52)

Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
H04R 25/505; G10K 11/17854; G10K 11/17881;
G10K 11/17885; G10L 21/0208; H04R 1/1083;
H04R 1/1041; H04R 2460/01

(22)

Anmeldetag: 05.03.2024

(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 ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
GE KH MA MD TN

(71)

Anmelder: Sivantos Pte. Ltd.
Singapore 539775 (SG)

(72)

Erfinder: KLATT, Willem Alexander
91058 Erlangen (DE)

(74)

Vertreter: FDST Patentanwälte
Nordostpark 16
90411 Nürnberg (DE)

(30)

Priorität: 06.04.2023 DE 102023203214
19.07.2023 DE 102023206841

(54)

VERFAHREN ZUR PARAMETRIERUNG EINES FILTERS FÜR EINE AKTIVE RAUSCHUNTERDRÜCKUNG EINES HÖRINSTRUMENTES

(57) Die Erfindung nennt ein Verfahren zur Parametrierung eines Filters (F) für eine aktive Rauschunterdrückung (ANC) eines Hörinstrumentes (1), welches an von einem Benutzer an einem Gehörgang (2) zu tragen ist, wobei das Filter (F) dazu eingerichtet ist, anhand eines Fehlersignals (e) eines In-Ohr-Mikrofons (M1) des Hörinstrumentes (1), welches einen ein Störgeräusch (d) enthaltenden Schall (S1) im Gehörgang (2) aufzeichnet, ein Korrektursignal (u) für einen in den Gehörgang (2) gerichteten Lautsprecher (L1) des Hörinstrumentes (1) zu generieren, der im Betrieb der aktiven Rauschunterdrückung (ANC) des Hörinstrumentes (1) aus dem Korrektursignal (u) einen Korrekturschall (k) zur Kompensation des Störgeräusches (d) im Gehörgang (2) erzeugt, und wobei Filterkoeffizienten (q) des Filters (F) mittels

eines Optimierungsproblems bestimmt werden. In besagtem Optimierungsproblem wird eine von besagten Filterkoeffizienten (q) und/oder besagtem Filter (F) abhängige Sensitivitätsfunktion, welche eine Übertragung des Störgeräusches (d) in das Fehlersignal (e) beschreibt, mit einer objektiven Gewichtungsfunktion (W_d) gewichtet und optimiert, insbesondere minimiert, wobei die besagte Optimierung, insbesondere Minimierung, unter wenigstens einer Nebenbedingung an die besagte Sensitivitätsfunktion und/oder an eine zu besagter Sensitivitätsfunktion komplementäre Sensitivitätsfunktion erfolgt, wobei die objektive Gewichtungsfunktion (W_d) durch eine Anzahl an stetig differenzierbaren, insbesondere analytischen Funktionen gegeben ist, und eine Bandpass-Charakteristik aufweist.

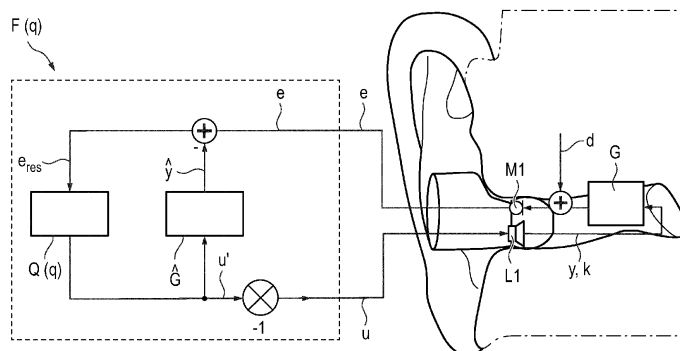


Fig. 3

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Parametrierung eines Filters für eine insbesondere nicht-adaptive aktive Rauschunterdrückung eines Hörinstrumentes, welches an von einem Benutzer an einem Gehörgang zu tragen ist, wobei das Filter dazu eingerichtet ist, anhand eines Fehlersignals eines In-Ohr-Mikrofons des Hörinstrumentes ein Korrektursignal für einen in den Gehörgang gerichteten Lautsprecher des Hörinstrumentes zu generieren, wobei Filterkoeffizienten des Filters mittels eines Optimierungsproblems bestimmt werden.

[0002] In Hörinstrumenten wie z.B. Kopfhörern, Headsets o.ä., aber auch Hörgeräten zur Versorgung einer Hörschwäche eines Trägers werden zunehmend auch Maßnahmen zur aktiven Rauschunterdrückung zur Verfügung gestellt, welche meist Störgeräusche der Umgebung unterdrückt, indem durch ein Korrektursignal über einen Lautsprecher des Hörinstrumentes in den Gehörgang des Benutzers ausgegeben wird. Hierbei kann ein Umgebungsschall z.B. durch ein in die Umgebung gerichtetes Mikrofon aufgenommen werden, um die dort vorhandenen Störgeräusche für die Erzeugung des Korrektursignals zu identifizieren. Alternativ dazu, oder je nach Ausgestaltung auch zusätzlich, kann ein in den Gehörgang gerichtetes Mikrofon verwendet werden, um direkt den Anteil der Störgeräusche aufzunehmen, welcher auf einem akustischen Übertragungspfad am Hörinstrument vorbei (welches den Eingang des Gehörgangs üblicherweise weitgehend verschließt) in den Gehörgang propagiert.

[0003] Von hoher Wichtigkeit ist in diesem Zusammenhang der jeweils für die aktive Rauschunterdrückung verwendete Algorithmus bzw. das Filter, welches anhand eines Eingangssignals des besagten Mikrofons das Korrektursignal zur Unterdrückung der Störgeräusche im Gehörgang erzeugt. Hierbei kann einerseits das Filter ein adaptives Filter sein, d.h., die Filterparameter hängen selbst ab vom Eingangssignal des Mikrofons, auf welches das Filter angewandt wird. Ein solches adaptives Filter erlaubt meist eine schnelle Reaktion auf Veränderungen im Eingangssignal, jedoch können infolge der ggf. stark veränderlichen Filterparameter (und fallweise schlechter Konvergenz derselben) auch Artefakte oder Überschwinger entstehen.

[0004] Andererseits kann das Filter auch statisch sein, d.h., die Filterparameter sind nicht abhängig vom Eingangssignal des Mikrofons, sodass das Filter im Wesentlichen statisch den besagten Übertragungspfad der Störgeräusche in den Gehörgang nachbildet (welcher auch weitgehend zeitunabhängig ist, bis auf minimale Veränderungen infolge von Kieferbewegungen o.ä. des Benutzers, die in erster Näherung jedoch vernachlässigbar sind). Ein solches statisches Filter vermeidet die o.g. Probleme der Konvergenz der Filterparameter, jedoch ist nun für die Präzision des Filters bei der Erzeugung des Korrektursignals das korrekte Modell für die Nachbildung des Übertragungspfades umso wichtiger.

[0005] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren anzugeben, mittels dessen ein Filter für eine insbesondere nicht-adaptive aktive Rauschunterdrückung eines Hörinstrumentes möglichst einfach und präzise parametrisiert werden kann.

[0006] Die genannte Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren zur Parametrierung eines Filters für eine insbesondere nicht-adaptive aktive Rauschunterdrückung eines Hörinstrumentes, welches an von einem Benutzer an einem Gehörgang zu tragen ist, wobei das Filter dazu eingerichtet ist, anhand eines Fehlersignals eines In-Ohr-Mikrofons des Hörinstrumentes, welches einen ein Störgeräusch enthaltenden Schall im Gehörgang aufzeichnet, ein Korrektursignal für einen in den Gehörgang gerichteten Lautsprecher des Hörinstrumentes zu generieren, der im Betrieb der aktiven Rauschunterdrückung des Hörinstrumentes aus dem Korrektursignal einen Korrekturschall zur Kompensation des Störgeräusches im Gehörgang erzeugt.

[0007] Verfahrensgemäß ist hierbei vorgesehen, dass Filterkoeffizienten des Filters mittels eines Optimierungsproblems bestimmt werden, wobei in besagtem Optimierungsproblem eine von besagten Filterkoeffizienten und/oder besagtem Filter abhängige Sensitivitätsfunktion, welche eine Übertragung des Störgeräusches in das Fehlersignal beschreibt, mit einer objektiven Gewichtungsfunktion gewichtet und optimiert, insbesondere minimiert wird, wobei die besagte Optimierung, insbesondere Minimierung, unter wenigstens einer Nebenbedingung an die besagte Sensitivitätsfunktion und/oder an eine zu besagter Sensitivitätsfunktion komplementäre Sensitivitätsfunktion erfolgt, und wobei die objektive Gewichtungsfunktion durch eine Anzahl an stetig differenzierbaren, insbesondere analytischen Funktionen gegeben ist, sowie eine Bandpass-Charakteristik aufweist.

[0008] Vorteilhafte und teils für sich gesehen erfinderische Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der nachfolgenden Beschreibung.

[0009] Als ein Hörinstrument ist hierbei generell jedwede Vorrichtung umfasst, welche dazu eingerichtet ist, aus einem elektrischen Signal - welches auch durch ein internes Signal der Vorrichtung gegeben sein kann - ein Schallsignal zu erzeugen und einem Gehör eines Trägers dieser Vorrichtung zuzuführen, also insbesondere ein Kopfhörer (z.B. als "Earplug"), ein Headset, eine Datenbrille mit Lautsprecher, etc. Als ein Hörinstrument ist aber auch ein Hörgerät im engeren Sinne umfasst, also ein Gerät zur Versorgung einer Hörschwäche des Trägers, in welchem ein aus einem Umgebungssignal mittels eines Mikrofons erzeugtes Eingangssignal zu einem Ausgangssignal verarbeitet und dabei insbesondere frequenzbandabhängig verstärkt wird, und ein aus dem Ausgangssignal mittels eines Lautsprechers o.ä. erzeugtes Ausgangsschallsignal dazu geeignet ist, insbesondere benutzerspezifisch die Hörschwäche des Trägers zumindest teilweise zu kompensieren.

[0010] Das Hörinstrument wird dabei im bestimmungsgemäßen Betrieb von einem Benutzer "an" einem Gehörgang getragen, worunter insbesondere zu verstehen ist, dass das Hörinstrument an einem Ohr getragen wird, und dabei den Gehörgang von außen wenigstens teilweise verschließt, und/oder dabei in den äußeren Gehörgang teilweise eindringt. Störgeräusche, welche auf einem akustischen Übertragungspfad am Hörinstrument vorbei in den Gehörgang gelangen, sind dann durch die aktive Rauschunterdrückung mittels des Korrekturschalls, welcher vom Hörinstrument über dessen in den besagten Gehörgang gerichteten Lautsprecher ausgegeben wird, zu kompensieren.

[0011] Das in-Ohr-Mikrofon ist hierbei bevorzugt ebenfalls in den Gehörgang gerichtet, d.h., wenn das Hörinstrument den äußeren Gehörgang bis auf den besagten akustischen Übertragungspfad weitgehend verschließt, wird hierdurch ein "innen" und ein "außen" bzgl. des Hörinstrumentes definiert, wobei das "innen" den weitgehend verschlossenen Gehörgang betrifft, und dass "außen" den gesamten, freien Außenraum.

[0012] Dies ist anhand von Figur 1 beschrieben. Figur 1 zeigt in einem Blockschaltbild eine aktive Rauschunterdrückung in einem Hörinstrument 1, welches an einem Gehörgang 2 einer Person getragen wird, und diesen dabei weitgehend verschließt. Durch diese Anordnung wird bezüglich des Hörinstrumentes 1 ein "innen" In definiert, welches durch den Gehörgang 2 "jenseits" der Komponenten des Hörinstrumentes 1 gegeben ist, und ein "außen" Out, welches durch den freien Raum, beginnend beim Ohr 4, gegeben ist.

[0013] Das Hörinstrument 1 weist dabei ein In-Ohr-Mikrofon M1 und einen Lautsprecher L1 auf, welche beide nach innen (In), also in den Gehörgang 2 hinein gerichtet sind, sodass ein vom Lautsprecher L1 erzeugter Ausgangsschall y in Richtung des (nicht dargestellten) Trommelfells am anderen Ende des Gehörgangs 2 propagiert, und das In-Ohr-Mikrofon M1 einen Schall S1 im Gehörgang 2 aufnimmt, welcher u.a. auch ein Störgeräusch d enthält, das auf einem akustischen Übertragungspfad H (gestrichelte Linie) am Hörinstrument 1 vorbei von außen (Out) in den Gehörgang 2 propagiert ist. Das Störgeräusch d kann dabei außen (Out) durch jedwede Art von Störgeräuschquelle als ein Störgeräusch r erzeugt werden, z.B. durch einen Motor eines Fahrzeugs oder einer Maschine wie etwa Verkehrslärm, Lüftergeräusche oder Maschinensurren/-brummen etc.

[0014] Der akustische Übertragungspfad H von außen (Out) nach innen (In) in den Gehörgang 2 (z.B. für die Propagation des Störgeräusches r in den Gehörgang 2 als Störgeräusch d) wird auch als der primäre Übertragungspfad bezeichnet. Der Übertragungspfad vom Lautsprecher L1 zum In-Ohr-Mikrofon M1 im Gehörgang 2 selbst wird als sekundärer Übertragungspfad G bezeichnet, und kann dabei insbesondere Resonanzen des Ausgangsschalls y im Gehörgang 2 beinhalten. Vorliegend sei auch eine Ausgangscharakteristik (also ein Frequenzgang) des Lautsprechers L1 in den sekundären Übertragungspfad G absorbiert.

[0015] Das In-Ohr-Mikrofon M1 erzeugt nun ein als Fehlersignal e bezeichnetes Eingangssignal, anhand dessen durch eine aktive Rauschunterdrückung ANC (welche hier als gestrichelter Block lediglich als Platzgründen außerhalb des Hörinstrumentes 1 eingezeichnet ist, jedoch physisch im Hörinstrument 1 auf einem geeigneten Signalprozessor bzw. einer Prozessoreinheit o.ä. implementiert wird) ein Korrektursignal u erzeugt wird. Das Korrektursignal u wird durch den Lautsprecher L1 in einen Korrekturschall k umgewandelt, welcher in den Ausgangsschall y eingeht. Eine A/D-Konvertierung des Fehlersignals e bzw. eine D/A-Konvertierung des Korrektursignals u sei hierbei funktional in das In-Ohr-Mikrofon M1 bzw. in den Lautsprecher L1 absorbiert.

[0016] Für die aktive Rauschunterdrückung ANC wird ein Filter F auf das Fehlersignal angewandt, welches von Filterkoeffizienten $\mathbf{q}$ (Koeffizientenvektor) abhängt, bzw. über diese parametrisiert werden kann.

[0017] Die Filterkoeffizienten q_k (Einträge k des Koeffizientenvektors $\mathbf{q}$) werden dabei verfahrensgemäß mittels eines Optimierungsproblems bestimmt, in welchem eine Sensitivitätsfunktion S, die die Übertragung des Störgeräusches d in das Fehlersignal e beschreibt, mit einer objektiven Gewichtungsfunktion W_d gewichtet und anschließend optimiert (vorzugsweise minimiert) wird.

[0018] Die Sensitivitätsfunktion beschreibt somit, welcher Anteil des Störgeräusches d (das ja durch das äußere Störgeräusch r und dessen Propagation über den primären Übertragungspfad H entsteht) in das Fehlersignal e eingeht, wobei zu berücksichtigen ist, dass das Fehlersignal e selbst vom über den sekundären Übertragungspfad G propagierten Korrektursignal u abhängt.

[0019] Beschreibt man das Filter F in seiner Abhängigkeit von den Filterkoeffizienten $\mathbf{q}$ als $F(\mathbf{q})$, so ergibt sich aus Fig. 1

$$(i) \quad e = d + G * u = d + F(\mathbf{q}) * G * e,$$

wobei * eine Faltung in der Zeitdomäne (oder der diskreten Zeitdomäne) bezeichnet. Durch Anwendung einer Z-Transformation auf Gleichung (i) erhält man die bereits angesprochene Relation zwischen dem Fehlersignal e und dem Störgeräusch d in der Z-Domäne als

(ii)

$$E(Z) = S(Z) \cdot D(Z) = \frac{D(Z)}{1 - F(q, Z) \cdot G(Z)}.$$

[0020] Um die Filterparameter $\mathbf{q}$ zu erhalten, wird also verfahrensgemäß die in Gleichung (ii) dargestellte Sensitivitätsfunktion $S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k})$ mit der frequenzabhängigen objektiven Gewichtungsfunktion $W_d(e^{j\Omega_k})$ gewichtet und minimiert:

$$(iii) \quad \min_{\mathbf{q}} \|S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) W_d(e^{j\Omega_k})\|_2^2$$

[0021] Die Minimierung erfolgt hierbei unter einer Nebenbedingung an die Sensitivitätsfunktion $S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k})$ und/oder an eine komplementäre Sensitivitätsfunktion $T(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k})$ mit $T(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) = 1 - S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k})$ für alle Parameter $\mathbf{q}$ und alle Frequenzargumente $e^{j\Omega_k}$.

[0022] Die objektive Gewichtungsfunktion $W_d(e^{j\Omega_k})$ ist hierbei derart gewählt, dass sie durch eine Anzahl an stetig differenzierbaren und insbesondere analytischen Funktionen (der Frequenz) gegeben ist, und zudem eine Bandpass-Charakteristik aufweist (die Abhängigkeit der Frequenz wird im Folgenden fallweise über $e^{j\Omega_k}$ oder über Ω_k ausgedrückt, je nachdem, welche Darstellung jeweils vorteilhafter ist).

[0023] Durch das vorliegende Optimierungsproblem und die zugehörige Wahl der objektiven Gewichtungsfunktion lässt sich das Filter zur Erzeugung des Korrektursignals der aktiven Rauschunterdrückung in besonders einfacher Weise bewerkstelligen, da keine direkte Messung an der Person selbst vonnöten ist. Vielmehr kann die objektive Gewichtungsfunktion konkret anhand statistischer Merkmale bestimmt werden, welche für eine überschaubare Anzahl an Probanden vermessen werden können, und dann einer Vielzahl an Benutzern zur Verfügung stehen.

[0024] Bevorzugt weist dabei die objektive Gewichtungsfunktion eine untere Bandgrenze in einem Frequenzintervall von 10 Hz bis 100 kHz, besonders bevorzugt von 40 Hz bis 80 Hz auf, und/oder eine obere Bandgrenze in einem Frequenzintervall von 200 Hz bis 800 kHz, besonders bevorzugt von 400 Hz bis 600 Hz, wobei die Bandgrenze jeweils gegeben ist durch diejenige Frequenz, an welcher einer Frequenzgang der objektiven Gewichtungsfunktion auf die Hälfte, bezogen auf den Maximalwert in dB, abgesunken ist. Außerhalb der genannten Frequenzbereiche ist mit dem genannten Filter eine aktive Rauschunterdrückung infolge eines Verlustes der Phasenrelation im Gehörgang nicht zufriedenstellend zu erreichen, sodass der Frequenzgang der objektiven Gewichtungsfunktion, anhand derer über das o.g. Optimierungsproblem das Filter parametrisiert wird, nur im relevanten Bereich wesentliche Beiträge aufzuweisen braucht.

[0025] Insbesondere weist der Frequenzgang der objektiven Gewichtungsfunktion wenigstens drei Wendepunkte auf. Dies bedeutet, dass die objektive Gewichtungsfunktion, welche den Frequenzgang typischer Störgeräusche modelliert wenigstens einen plateau- oder buckelförmigen Bereich aufweist. Die Möglichkeit, in der objektiven Gewichtungsfunktion ein derartiges Plateau zu erzeugen, erlaubt eine Hervorhebung eines Subfrequenzbands innerhalb des eigentlichen Bandpassbereichs, in dem die aktive Rauschunterdrückung besonders wirken soll.

[0026] Die objektive Gewichtungsfunktion beinhaltet bevorzugt eine Summe einer aufsteigenden, geglätteten Stufenfunktion und einer absteigenden, geglätteten Stufenfunktion, wobei die aufsteigende und die absteigende geglättete Stufenfunktion jeweils durch eine Sigmoid-Funktion oder eine Arkustangens- bzw. Arkuskotangens-Funktion gegeben sind. Diese Funktionen sind besonders leicht zu parametrieren, und zudem bei numerischen Verfahren für die Durchführung des Optimierungsproblems (iii) besonders stabil.

[0027] Zweckmäßigerweise beinhaltet die objektive Gewichtungsfunktion weiter eine Gaußfunktion und/oder ein konstantes Glied. Hierdurch erhält man über die entsprechenden Variablen der Gaußfunktion weitere Freiheitsgrade, welche eine besonders präzise Anpassung der objektiven Gewichtungsfunktion erlauben.

[0028] Die objektive Gewichtungsfunktion $W_d(\Omega_k)$ des Frequenzargumentes Ω_k weist somit vorteilhafterweise die folgende Form auf:

$$W_d(\Omega_k) = K_0 + \frac{a_{sig1}}{1 + e^{b_{sig1} \log_{10}\left(\frac{\Omega_k}{\Omega_{sig1}}\right)}} + \frac{a_{sig2}}{1 + e^{b_{sig2} \log_{10}\left(\frac{\Omega_k}{\Omega_{sig2}}\right)}} + a_g e^{-b_g \log_{10}^2\left(\frac{\Omega_k}{\Omega_g}\right)},$$

(iv)

wobei K_0 ein konstantes Glied ist, wobei die Amplitudenparameter a_{sig1} , a_{sig2} , a_g , die Frequenzparameter Ω_{sig1} , Ω_{sig2} ,

Ω_g (bevorzugt mit $\Omega_{sig1} < \Omega_{sig2}$) und die Steigungsparameter b_{sig1} , b_{sig2} , b_g zur Parametrierung des Frequenzgangs verwendet werden, und dabei die Produkte aus a_{sig1} und b_{sig1} einerseits und aus a_{sig2} und b_{sig2} andererseits entgegengesetzte Vorzeichen aufweisen. Der zweite und der dritte Term auf der rechten Seite der Gleichung (iv) stellen jeweils Sigmoid-Funktionen dar, der vierte Term ist eine Gaußfunktion.

[0029] In Figur 2a und 2b sind die Zusammenhänge für einzelne der hier genannten Parameter illustriert. Figur 2a (links oben) zeigt die Abhängigkeit einer Sigmoid-Funktion über dem Frequenzargument Ω_k für verschiedene Werte von b_{sig} . Wie man erkennen kann, wird mit zunehmendem Parameter b_{sig} die Steigung steiler, und die Stufe kürzer. Dies ist vergleichbar mit dem bekannten Zusammenhang für Gaußfunktionen, welche mit zunehmendem Parameter b_g im Exponenten (also abnehmender Varianz) schmaler und (infolge der Normierung) dadurch spitzer werden. Figur 2b (oben rechts) zeigt den Zusammenhang zwischen den Vorzeichen von a_{sig} und b_{sig} . Eine steigende Sigmoid-Funktion erhält man offenkundig dann, wenn die beiden Parameter unterschiedliche Vorzeichen aufweisen, während man für identische Vorzeichen von a_{sig} und b_{sig} eine fallende Sigmoid-Funktion erhält.

[0030] Zweckmäßigerweise erzeugt besagtes Filter F (siehe Figur 1) angewandt auf das Fehlersignal e das Korrektursignal u , wobei das Filter F ein Steuerfilter Q und ein Sekundärfilter $\hat{G}$ aufweist, wobei das Steuerfilter Q angewandt wird auf ein residuales Fehlersignal e_{res} , und hieraus bis auf einen konstanten Faktor das Korrektursignal u erzeugt wird, wobei das residuale Fehlersignal e_{res} erzeugt wird anhand einer Differenz aus dem Fehlersignal e und dem rückgekoppelten und mit dem Sekundärfilter $\hat{G}$ gefilterten Korrektursignal u , und wobei als besagte Filterkoeffizienten in der Optimierung die Koeffizienten des Steuerfilters Q (q) bestimmt werden. Bevorzugt wird dabei das Sekundärfilter $\hat{G}$ derart gewählt wird, dass es den Sekundärpfad G nachbildet, welcher im Gehörgang 2 vom Lautsprecher L1 zum In-Ohr-Mikrofon M1 führt.

[0031] Dies wird anhand von Figur 3 illustriert, welche das Filter F nach Figur 1 schematisch in einem Blockschaltbild beschreibt. Für die aktive Rauschunterdrückung ANC wird also auf das Fehlersignal e das Filter F (q) angewandt, welches ein Steuerfilter Q (q) und das Sekundärfilter $\hat{G}$ aufweist. Das Steuerfilter Q (q) wird hierbei angewandt auf das residuale Fehlersignal e_{res} , woraus bis auf einen konstanten Faktor, welcher vorliegend zu -1 gewählt wird, das Korrektursignal u resultiert. Das residuale Fehlersignal e_{res} wird hierbei erzeugt anhand des aus dem Steuerfilter Q (q) resultierenden Korrektursignal u' (der Faktor -1 ist lediglich eine Phase), auf welches das Sekundärfilter $\hat{G}$ angewandt wird. Das hieraus resultierende Signal y wird vom Fehlersignal e zur Erzeugung des residualen Fehlersignals e_{res} subtrahiert.

[0032] Günstigerweise wird dabei für eine Mehrzahl an Probanden jeweils der Sekundärpfad frequenzweise vermessen, wobei das Sekundärfilter frequenzweise anhand des jeweiligen Minimums über alle Sekundärpfade bei der betreffenden Frequenz gebildet wird. Somit muss man Messungen nur für eine relativ überschaubare Anzahl an Probanden (meist im zweistelligen Bereich) durchführen, und kann die Ergebnisse dann für eine Vielzahl an Benutzern (auch im fünf- bis sechststelligen Bereich oder gar noch höher) in deren jeweiligen Hörinstrumenten nutzen.

[0033] Bevorzugt wird dabei das Sekundärfilter $\hat{G}(e^{j\Omega_k})$ in Abhängigkeit der Frequenz Ω_k gebildet wird als derjenige von allen gemessenen Sekundärpfade (G), welcher das größte Maximum über alle betrachteten Frequenzen aufweist,

$$\hat{G}(e^{j\Omega_k}) = \arg \max_{G \in \mathcal{G}_d} \|G(e^{j\Omega_k})\|_{\infty} \Leftrightarrow \arg \max_{G \in \mathcal{G}_d} \max_{\Omega_k} |G(e^{j\Omega_k})|, \quad k = 0, \dots, N_{\Omega} - 1$$

(v)

wobei die Menge $\mathcal{G}_d$ die Menge aller gemessenen Sekundärpfade bezeichnet, und N_{Ω} die Anzahl diskreter Frequenzen. Dies ist eine besonders robuste Bestimmung für das Sekundärfilter $\hat{G}(e^{j\Omega_k})$.

[0034] Alternativ dazu kann für jeden der gemessenen Sekundärpfade G_m eine frequenzweise Grenzfunktion $W_{G,m}(e^{j\Omega_k})$ definiert werden als

$$W_{G,m}(e^{j\Omega_k}) = \max_{G \in \mathcal{G}'_d} \left| \frac{G(e^{j\Omega_k}) - G_m(e^{j\Omega_k})}{G_m(e^{j\Omega_k})} \right|, \quad m = 1, \dots, M_G,$$

(vi)

wobei M_G die Anzahl der Probanden ist, und die Menge $\mathcal{G}'_d$ die Menge der gemessenen Sekundärpfade ohne den Sekundärpfad m bezeichnet, wobei das Sekundärfilter $\hat{G}(e^{j\Omega_k})$ in Abhängigkeit des Frequenzargumentes $e^{j\Omega_k}$ gebildet wird als das frequenzweisen Minimums über alle Grenzfunktionen,

$$\hat{G}(e^{j\Omega_k}) = \arg \min_{G \in \mathcal{G}_d} \|W_{G,m}(e^{j\Omega_k})\|_{\infty} = \arg \min_{G \in \mathcal{G}_d} \sup_{\Omega_k} |W_{G,m}(e^{j\Omega_k})|$$

wobei die Menge $\mathbf{G}_d$ die Menge aller gemessenen Sekundärpfade bezeichnet.

[0035] Dies bedeutet insbesondere: Für jede Frequenz $e^{j\Omega_k}$ und jeden Sekundärpfad G_m (also jeden gemessenen sekundären Übertragungspfad eines zugehörigen Probanden m) wird zunächst die Grenzfunktion $W_{G,m}(e^{j\Omega_k})$ gebildet als derjenige Wert, für welchen der Absolutbetrag des Bruches in der Gleichung (vi) ein Maximum einnimmt. Dieser Bruch bildet für alle anderen gemessenen Sekundärpfade G , $G \in \mathbf{G}_d$ die relative Abweichung vom Sekundärpfad G_m . Hat man nun also für jeden Probanden m und seinen gemessenen Sekundärpfad G_m jeweils bei jeder Frequenz $e^{j\Omega_k}$ die maximale relative Abweichung eines anderen gemessenen Sekundärpfades ermittelt, bilden diese Werte jeweils die Grenzfunktion $W_{G,m}(e^{j\Omega_k})$.

[0036] Nun wird jeweils bei jeder Frequenz $e^{j\Omega_k}$ der minimale Wert über alle Grenzfunktionen der einzelnen Probanden m ermittelt, siehe Gleichung (vi), und der jeweilige Sekundärpfad, bei welchem für eine Frequenz $e^{j\Omega_k}$ die Grenzfunktion minimal wird, als der Wert des Sekundärfilters $\hat{G}(e^{j\Omega_k})$ bei dieser Frequenz $e^{j\Omega_k}$ bestimmt.

[0037] Günstigerweise wird die Sensitivitätsfunktion $S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k})$ in Abhängigkeit der Filterkoeffizienten $\mathbf{q}$ des Steuerfilters Q und der Frequenz $e^{j\Omega_k}$ sowie in Abhängigkeit des Sekundärfilters $\hat{G}(e^{j\Omega_k})$ gebildet als

$$S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) = 1 + Q(e^{j\Omega_k})\hat{G}(e^{j\Omega_k}).$$

[0038] Dies lässt sich anhand von Figur 3 besonders gut erkennen.

[0039] Das Optimierungsproblem ist zweckmäßigerweise von der folgenden Gestalt:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{q}} \quad & \| S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) W_d(e^{j\Omega_k}) \|_2^2 \\ \text{s. t.} \quad & \| T(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) W_T(e^{j\Omega_k}) \|_\infty < 1 \\ & \| S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) W_S(e^{j\Omega_k}) \|_\infty < 1 \end{aligned}$$

(vii)

[0040] S bezeichnet hier Sensitivitätsfunktion, W_d die objektive Gewichtungsfunktion, $\mathbf{q}$ den Vektor der Filterkoeffizienten, T die komplementäre Sensitivitätsfunktion (also $T = 1 - S$), und W_s sowie W_T frequenzweise Bedingungen für die Sensitivitätsfunktion bzw. die komplementäre Sensitivitätsfunktion. Die Bedingungen W_s und W_T an S und T sind hierbei in der Supremumsnorm formuliert.

[0041] Hierbei kann über die Sensitivitätsfunktion S beispielsweise eingestellt werden, wie hoch die Verstärkung von Störungen allgemein ist. Aus Gründen der Normierung muss das Integral über den Logarithmus von $|S(e^{j\Omega_k})|$ bis zu einer Grenzfrequenz beschränkt zu < 1 sein. Hierdurch ergibt sich, dass es Bereiche für $|S(e^{j\Omega_k})|$ gibt, welche < 1 sind, und solche Bereiche, in denen $|S(e^{j\Omega_k})| > 1$ gilt. In letztgenannten wird allg. eine Störung verstärkt ("disturbance amplification"). über die konkrete Form von S kann nun eingestellt werden, bis zu welchen Frequenzbereichen das System Störungen unterdrückt. Diese Bereiche sind bevorzugt auf diejenigen die Frequenzbereiche abzustimmen, in denen die objektiven Gewichtungsfunktion W_d wesentlich von Null verschiedene Werte einnimmt.

[0042] Bevorzugt wird die Bedingung W_T anhand einer Analyse der Varianz einer Mehrzahl an gemessenen Sekundärpfaden gebildet, und/oder die Bedingung W_s in Abhängigkeit einer Nominal Performance bzw. einer Obergrenze für eine Rauschverstärkung gebildet wird. Die Nominal Performance ist insbesondere gegeben durch den Fall, in welchem das Modell für den Sekundärpfad den tatsächlichen Sekundärpfad nachbildet.

[0043] Die Erfindung nennt weiter ein Verfahren zur aktiven Rauschunterdrückung in einem Hörinstrument, insbesondere einem Hörgerät, sowie ein Hörinstrument, welches zur Durchführung eines solchen Verfahrens zur aktiven Rauschunterdrückung eingerichtet ist.

[0044] Für das Verfahren zur aktiven Rauschunterdrückung wird mittels eines In-Ohr-Mikrofons des Hörinstrumentes in einem Gehörgang eines Benutzers ein Schallsignal, welches ein Störgeräusch aufweist, in ein Fehlersignal umgewandelt, wobei durch ein Filter anhand des Fehlersignals ein Korrektursignal generiert wird, wobei das Korrektursignal durch einen in den Gehörgang gerichteten Lautsprecher des Hörinstrumentes in einen Korrekturschall zur Kompensation des Störgeräusches umgewandelt wird, und wobei Filterkoeffizienten des Filters mittels des entsprechenden vorbeschriebenen Verfahrens parametrisiert werden. Dies umfasst insbesondere, dass die Filterkoeffizienten $\mathbf{q}$ eines Steuerfilters Q durch das oben beschriebene Optimierungsproblem, bevorzugt nach Gleichung (iii) und insbesondere nach Gleichung (vii), ermittelt werden.

[0045] Das besagte, erfindungsgemäße Hörinstrument umfasst ein In-Ohr-Mikrofon, welches dazu eingerichtet ist, beim bestimmungsgemäßen Tragen durch einen Benutzer ein Schallsignal in einem Gehörgang des Benutzers aufzuzeichnen, einen Lautsprecher, welcher beim bestimmungsgemäßen Tragen durch den Benutzer in den Gehörgang gerichtet ist, und eine Signalverarbeitungseinheit, wobei das Hörinstrument dazu eingerichtet ist, das besagte Verfahren

zur aktiven Rauschunterdrückung durchzuführen.

[0046] Das erfindungsgemäße Verfahren zur aktiven Rauschunterdrückung in einem Hörinstrument und das Hörinstrument teilen die Vorzüge des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Parametrierung eines Filters für eine aktive Rauschunterdrückung eines Hörinstrumentes. Die für letztgenanntes Verfahren genannten Vorteile können sinngemäß, mutatis mutandis, auf das Verfahren zur aktiven Rauschunterdrückung in einem Hörinstrument und auf das Hörinstrument übertragen werden.

[0047] Die Erfindung nennt zudem ein Verfahren zur Modellierung eines Sekundärfilters, das einen Sekundärpfad nachbildet, welcher in einem Gehörgang eines Benutzers eines Hörinstruments von einem dort angeordneten Lautsprecher des Hörinstruments zu einem in den Gehörgang gerichteten In-Ohr-Mikrofon des Hörinstruments führt, wobei für eine Mehrzahl an Probanden jeweils der Sekundärpfad frequenzweise vermessen wird, und wobei das Sekundärfilter frequenzweise anhand des jeweiligen Minimums über alle Sekundärpfade bei der betreffenden Frequenz gebildet wird.

[0048] Bevorzugt wird hierbei das Sekundärfilter $\hat{G}(e^{j\Omega_k})$ in Abhängigkeit des Frequenzargumentes $e^{j\Omega_k}$ gebildet wird nach Gleichung (v).

[0049] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand von Zeichnungen näher erläutert. Hierbei zeigen jeweils schematisch:

Fig. 1 in einem Blockschaltbild eine aktive Rauschunterdrückung in einem Hörinstrument, welches an einem Gehörgang einer Person getragen wird,

Fig. 2a die Abhängigkeit einer Sigmoid-Funktion für verschiedene Parameter im Exponenten über der Frequenz,

Fig. 2b den Zusammenhang zwischen den Vorzeichen von des Vorfaktors und des Parameters im Exponenten einer Sigmoid-Funktion,

Fig. 3 in einem Blockschaltbild eine detaillierte Ausgestaltung des Filters der aktiven Rauschunterdrückung nach Fig. 1, und

Fig. 4 eine modellierte objektive Gewichtungsfunktion für das Filter nach Fig. 3 über der Frequenz, und ein entsprechendes gemessenes Spektrum.

[0050] Einander entsprechende Teile und Größen sind in allen Figuren jeweils mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0051] In Figur 4 ist im oberen Bild über der Frequenz eine objektive Gewichtungsfunktion W_d dargestellt, wie sie für das o.g. Optimierungsverfahren zu verwenden ist. Die objektiven Gewichtungsfunktion W_d ist dabei von der in Gleichung (iv) definierten Form, wobei die steigende Flanke 8 der ersten Sigmoid-Funktion (mit $a_{\text{sig1}}/b_{\text{sig1}}$) entspricht, und die fallende Flanke 10 der zweiten Sigmoid-Funktion (mit $a_{\text{sig2}}/b_{\text{sig2}}$). Die Ausbuchtung 12, welche einen zusätzlichen Wendepunkt 14 beinhaltet und in ein angedeutetes Plateau 16 führt, entspricht der Gaußfunktion in Gleichung (iv). Die steigende Flanke 8 repräsentiert dabei eine untere Bandgrenze 9 der objektiven Gewichtungsfunktion W_d , welche vorliegend im Bereich von ca. 65-70Hz lokalisiert ist (Abfall auf Hälfte des Maximalwertes), die fallende Flanke 10 eine obere Bandgrenze 11 bei ca. 500 Hz.

[0052] Im unteren Bild der Figur 4 ist ein an einem Probanden gemessenes Spektrum für einen Rauschprozess gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die objektive Gewichtungsfunktion W_d ein markanteres Bandpass-Verhalten aufweist, und zudem deutlich glatter ist, was die Parametrierung eines Filters deutlich erleichtert.

[0053] Obwohl die Erfindung im Detail durch das bevorzugte Ausführungsbeispiel näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

[0054]

- 1 Hörinstrument
- 2 Gehörgang
- 4 Ohr
- 8 steigende Flanke
- 9 untere Bandgrenze
- 10 fallende Flanke
- 11 obere Bandgrenze
- 12 Ausbuchtung

14	zusätzlicher Wendepunkt
16	angedeutetes Plateau
ANC	aktive Rauschunterdrückung
d	Störgeräusch (im Gehörgang)
5 e	Fehlersignal
e_{res}	residuales Fehlersignal
F	Filter
G	sekundärer Übertragungspfad
$\hat{G}$	Sekundärfilter
10 H	primärer (akustischer) Übertragungspfad
In	innen
k	Korrekturschall
L1	Lautsprecher
M1	In-Ohr-Mikrofon
15 Out	außen
Q	Steuerfilter
q	Filterkoeffizienten
r	Störgeräusch
S1	Schall (im Gehörgang)
20 u	Korrektursignal
W_d	objektive Gewichtungsfunktion
y	Ausgangsschall
$\hat{y}$	resultierendes Signal (aus Sekundärfilter)

Patentansprüche

1. Verfahren zur Parametrierung eines Filters (F) für eine aktive Rauschunterdrückung (ANC) eines Hörinstrumentes (1), welches an von einem Benutzer an einem Gehörgang (2) zu tragen ist,

wobei das Filter (F) dazu eingerichtet ist, anhand eines Fehlersignals (e) eines In-Ohr-Mikrofons (M1) des Hörinstrumentes (1), welches einen ein Störgeräusch (d) enthaltenden Schall (S1) im Gehörgang (2) aufzeichnet, ein Korrektursignal (u) für einen in den Gehörgang (2) gerichteten Lautsprecher (L1) des Hörinstrumentes (1) zu generieren, der im Betrieb der aktiven Rauschunterdrückung (ANC) des Hörinstrumentes (1) aus dem Korrektursignal (u) einen Korrekturschall (k) zur Kompensation des Störgeräusches (d) im Gehörgang (2) erzeugt,

wobei Filterkoeffizienten (q) des Filters (F) mittels eines Optimierungsproblems bestimmt werden, wobei in besagtem Optimierungsproblem eine von besagten Filterkoeffizienten (q) und/oder besagtem Filter (F) abhängige Sensitivitätsfunktion, welche eine Übertragung des Störgeräusches (d) in das Fehlersignal (e) beschreibt, mit einer objektiven Gewichtungsfunktion (W_d) gewichtet und optimiert, insbesondere minimiert wird, wobei die besagte Optimierung, insbesondere Minimierung, unter wenigstens einer Nebenbedingung an die besagte Sensitivitätsfunktion und/oder an eine zu besagter Sensitivitätsfunktion komplementäre Sensitivitätsfunktion erfolgt,

wobei die objektive Gewichtungsfunktion (W_d)

- durch eine Anzahl an stetig differenzierbaren, insbesondere analytischen Funktionen gegeben ist, und
- eine Bandpass-Charakteristik aufweist.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

wobei die objektive Gewichtungsfunktion (W_d)

- eine untere Bandgrenze (9) in einem Frequenzintervall von 10 Hz bis 100 kHz aufweist, und/oder
- eine obere Bandgrenze (11) in einem Frequenzintervall von 200 Hz bis 800 kHz aufweist,

wobei die untere bzw. obere Bandgrenze (9,11) gegeben ist durch diejenige Frequenz, an welcher einer Frequenzgang der objektiven Gewichtungsfunktion (W_d) auf die Hälfte, bezogen auf den Maximalwert in dB, abgesunken ist.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei die objektive Gewichtungsfunktion (W_d) eine Summe einer aufsteigenden, geglätteten Stufenfunktion und einer absteigenden, geglätteten Stufenfunktion beinhaltet, und
wobei die aufsteigende und die absteigende geglättete Stufenfunktion jeweils durch eine Sigmoid-Funktion oder eine Arkustangens- bzw. Arkuskotangens-Funktion gegeben sind.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei die objektive Gewichtungsfunktion (W_d) weiter eine Gaußfunktion und/oder ein konstantes Glied beinhaltet.

5. Verfahren nach Anspruch 3 i.V.m. Anspruch 4,

wobei die objektive Gewichtungsfunktion $W_d(\Omega_k)$ des Frequenzargumentes Ω_k die folgende Form aufweist:

$$W_d(\Omega_k) = K_0 + \frac{a_{sig1}}{1 + e^{b_{sig1} \log_{10}\left(\frac{\Omega_k}{\Omega_{sig1}}\right)}} + \frac{a_{sig2}}{1 + e^{b_{sig2} \log_{10}\left(\frac{\Omega_k}{\Omega_{sig2}}\right)}} + a_g e^{-b_g \log_{10}^2\left(\frac{\Omega_k}{\Omega_g}\right)}, \Omega_{sig1} < \Omega_{sig2}$$

wobei K_0 ein konstantes Glied ist,

wobei die Amplitudenparameter a_{sig1} , a_{sig2} , a_g , die Frequenzparameter Ω_{sig1} , Ω_{sig2} , Ω_g und die Steigungsparameter b_{sig1} , b_{sig2} , b_g zur Parametrierung des Frequenzgangs verwendet werden, und dabei die Produkte aus a_{sig1} und b_{sig1} einerseits und aus a_{sig2} und b_{sig2} andererseits entgegengesetzte Vorzeichen aufweisen.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

- wobei besagtes Filter (F) angewandt auf das Fehlersignal (e) das Korrektursignal (u) erzeugt,
- wobei das Filter (F) ein Steuerfilter (Q) und ein Sekundärfilter ($\hat{G}$) aufweist,
- wobei das Steuerfilter (Q) angewandt wird auf ein residuales Fehlersignal (e_{res}), und hieraus bis auf einen konstanten Faktor das Korrektursignal (u) erzeugt wird,
- wobei das residuale Fehlersignal (e_{res}) erzeugt wird anhand einer Differenz aus dem Fehlersignal (e) und dem rückgekoppelten und mit dem Sekundärfilter (G) gefilterten Korrektursignal (u), und

wobei als besagte Filterkoeffizienten ($\mathbf{q}$) in der Optimierung die Koeffizienten des Steuerfilters (Q) bestimmt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6,

wobei das Sekundärfilter ($\hat{G}$) derart gewählt wird, dass es einen Sekundärpfad (G) nachbildet, welcher im Gehörgang (2) vom Lautsprecher (L1) zum In-Ohr-Mikrofon (M1) führt.

8. Verfahren nach Anspruch 7,

wobei für eine Mehrzahl an Probanden jeweils der Sekundärpfad (G) frequenzweise vermessen wird, und wobei das Sekundärfilter ($\hat{G}$) gebildet wird als derjenige aller gemessenen Sekundärpfade (G), welcher das größte Maximum über alle betrachteten Frequenzen aufweist.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8,

wobei die Sensitivitätsfunktion $S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k})$ in Abhängigkeit der Filterkoeffizienten $\mathbf{q}$ des Steuerfilters Q und des Frequenzargumentes $e^{j\Omega_k}$ sowie in Abhängigkeit des Sekundärfilters $\hat{G}(e^{j\Omega_k})$ gebildet wird als

$$S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) = 1 + Q(e^{j\Omega_k})\hat{G}(e^{j\Omega_k})$$

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Optimierungsproblem von der folgenden Gestalt ist:

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{q}} \quad \| S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) W_d(e^{j\Omega_k}) \|_2^2 \\
& \text{s. t.} \quad \| T(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) W_T(e^{j\Omega_k}) \|_\infty < 1 \\
& \quad \quad \quad \| S(\mathbf{q}, e^{j\Omega_k}) W_s(e^{j\Omega_k}) \|_\infty < 1
\end{aligned}$$

wobei S die Sensitivitätsfunktion bezeichnet, W_d die objektive Gewichtsfunction, $\mathbf{q}$ den Vektor der Filterkoeffizienten, T die komplementäre Sensitivitätsfunktion (also $T = 1 - S$), und W_s sowie W_T frequenzweise Bedingungen für die Sensitivitätsfunktion bzw. die komplementäre Sensitivitätsfunktion,

11. Verfahren nach Anspruch 10,

wobei die Bedingung W_T anhand einer Analyse der Varianz einer Mehrzahl an gemessenen Sekundärpfaden (G) gebildet wird, und/oder wobei die Bedingung W_s in Abhängigkeit einer Nominal Performance bzw. einer Obergrenze für eine Rauschverstärkung gebildet wird.

12. Verfahren zur aktiven Rauschunterdrückung (ANC) in einem Hörinstrument (1), insbesondere einem Hörgerät,

wobei mittels eines In-Ohr-Mikrofons (M1) des Hörinstrumentes (1) in einem Gehörgang (2) eines Benutzers einen Schall (S1), welcher ein Störgeräusch (d) aufweist, in ein Fehlersignal (e) umgewandelt wird, wobei durch ein Filter (F) anhand des Fehlersignals (e) ein Korrektursignal (u) generiert wird, wobei das Korrektursignal (u) durch einen in den Gehörgang (2) gerichteten Lautsprecher (L1) des Hörinstrumentes (1) in einen Korrekturschall (k) zur Kompensation des Störgeräusches (d) umgewandelt wird, und wobei Filterkoeffizienten ($\mathbf{q}$) des Filters (F) mittels eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche parametrisiert werden.

13. Hörinstrument (1), umfassend:

- ein In-Ohr-Mikrofon (M1), welches dazu eingerichtet ist, beim bestimmungsgemäßen Tragen durch einen Benutzer einen Schall (S1) in einem Gehörgang (2) des Benutzers aufzuzeichnen,
- einen Lautsprecher (L1), welcher beim bestimmungsgemäßen Tragen durch den Benutzer in den Gehörgang (2) gerichtet ist, und
- eine Signalverarbeitungseinheit,

wobei das Hörinstrument (1) dazu eingerichtet ist, das Verfahren nach Anspruch 12 durchzuführen.

14. Verfahren zur Modellierung eines Sekundärfilters ($\hat{G}$), das einen Sekundärpfad (G) nachbildet, welcher in einem Gehörgang (2) eines Benutzers eines Hörinstrumentes (1) von einem dort angeordneten Lautsprecher (L1) des Hörinstrumentes (1) zu einem in den Gehörgang (2) gerichteten In-Ohr-Mikrofon (M1) des Hörinstrumentes (1) führt,

wobei für eine Mehrzahl an Probanden jeweils der Sekundärpfad (G) frequenzweise vermessen wird, und wobei das Sekundärfilter ($\hat{G}$) frequenzweise anhand des jeweiligen Minimums über alle Sekundärpfade (G) bei der betreffenden Frequenz gebildet wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14,

wobei das Sekundärfilter $\hat{G}(e^{j\Omega_k})$ in Abhängigkeit der Frequenz Ω_k gebildet wird als derjenige aller gemessenen Sekundärpfade (G), welcher das größte Maximum über alle betrachteten Frequenzen aufweist,

$$\hat{G}(e^{j\Omega_k}) = \arg \max_{G \in \mathcal{G}_d} \| G(e^{j\Omega_k}) \|_\infty \Leftrightarrow \arg \max_{G \in \mathcal{G}_d} \max_{\Omega_k} | G(e^{j\Omega_k}) |, \quad k = 0, \dots, N_\Omega - 1$$

wobei die Menge $\mathcal{G}_d$ die Menge aller gemessenen Sekundärpfade bezeichnet, und N_Ω die Anzahl diskreter Frequenzen.

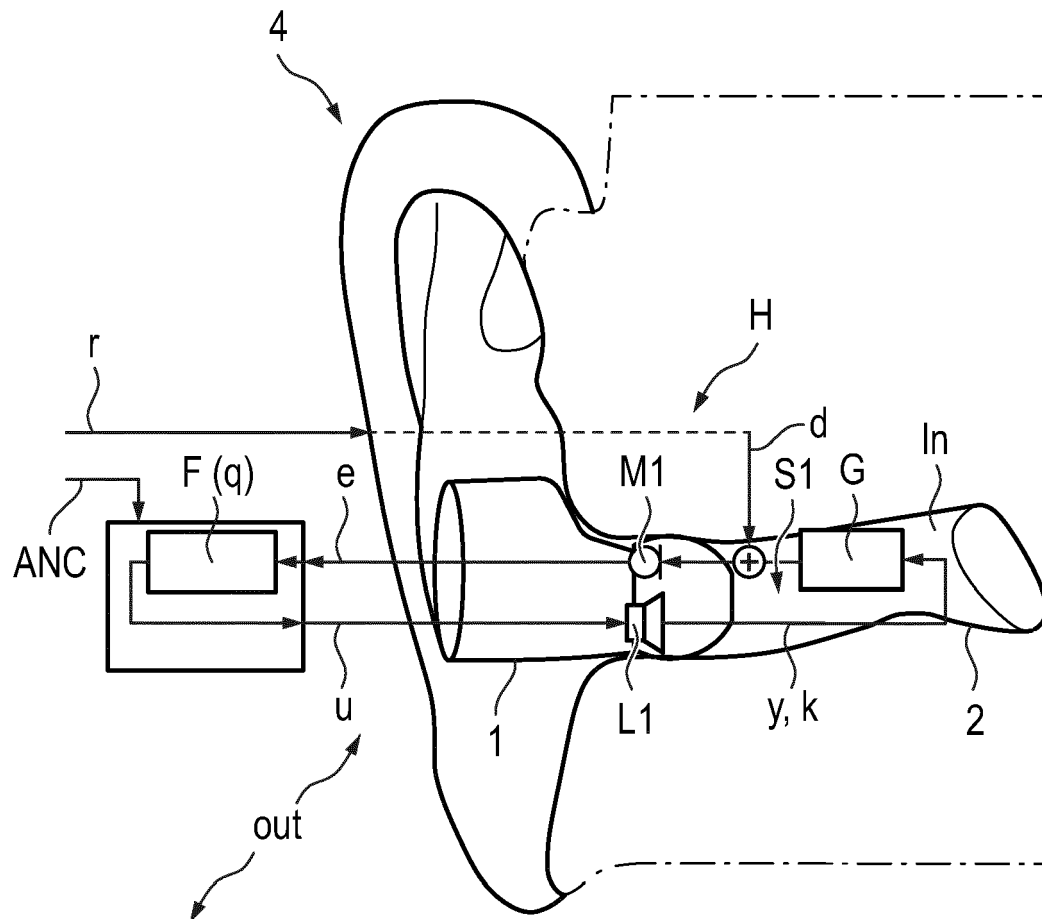


Fig. 1

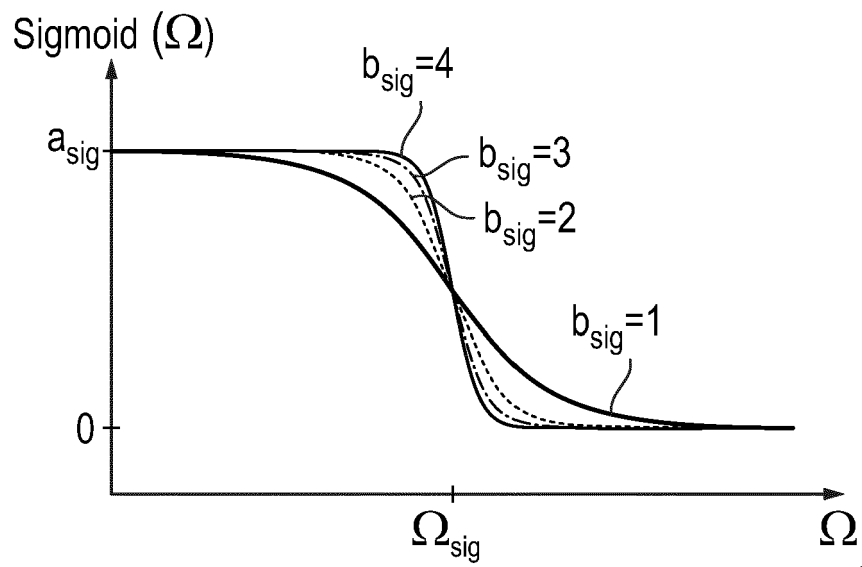


Fig. 2a

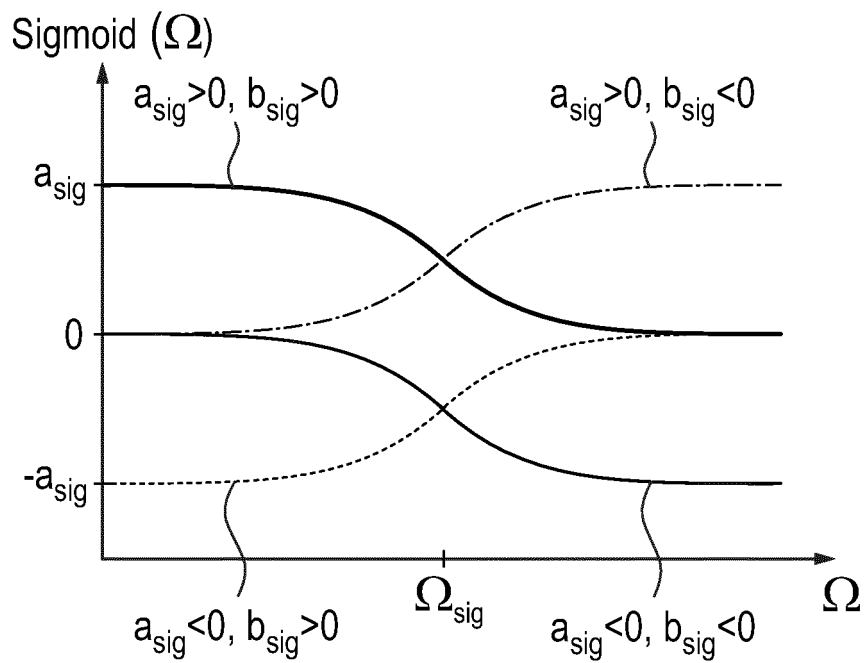


Fig. 2b

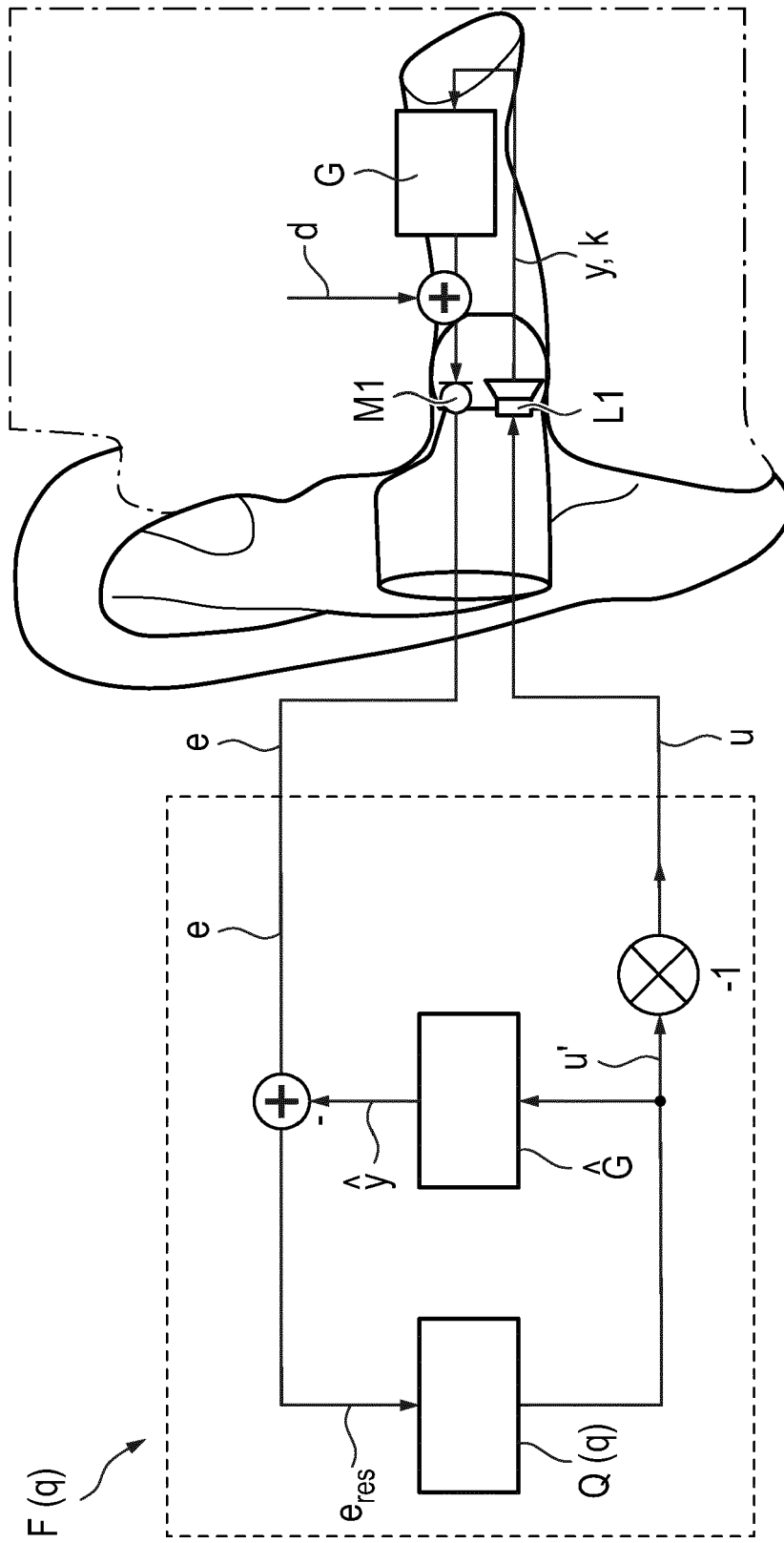


Fig. 3

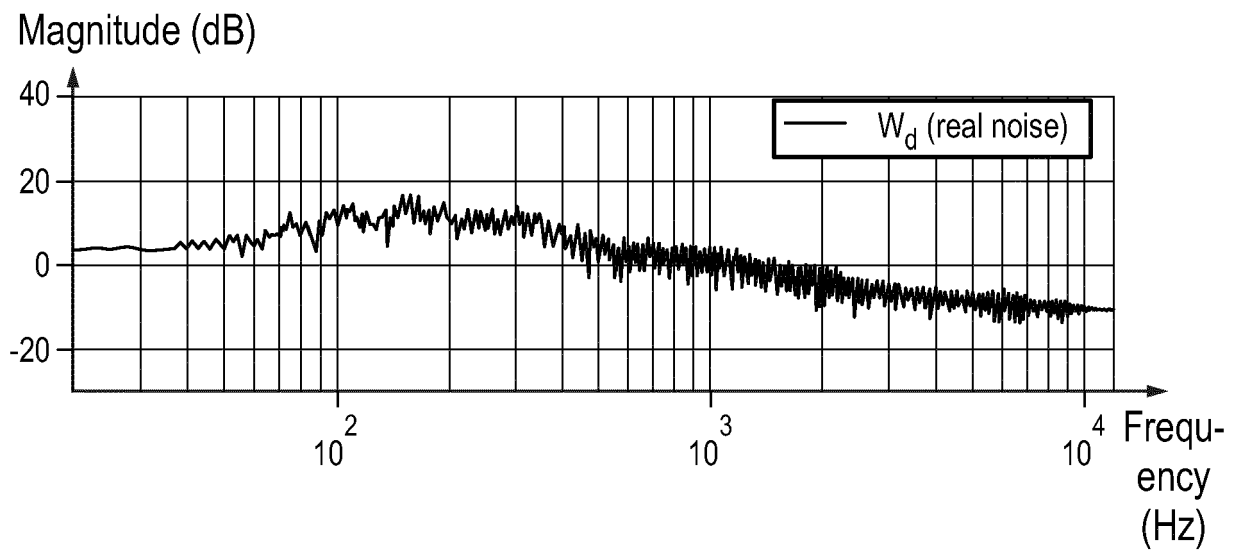
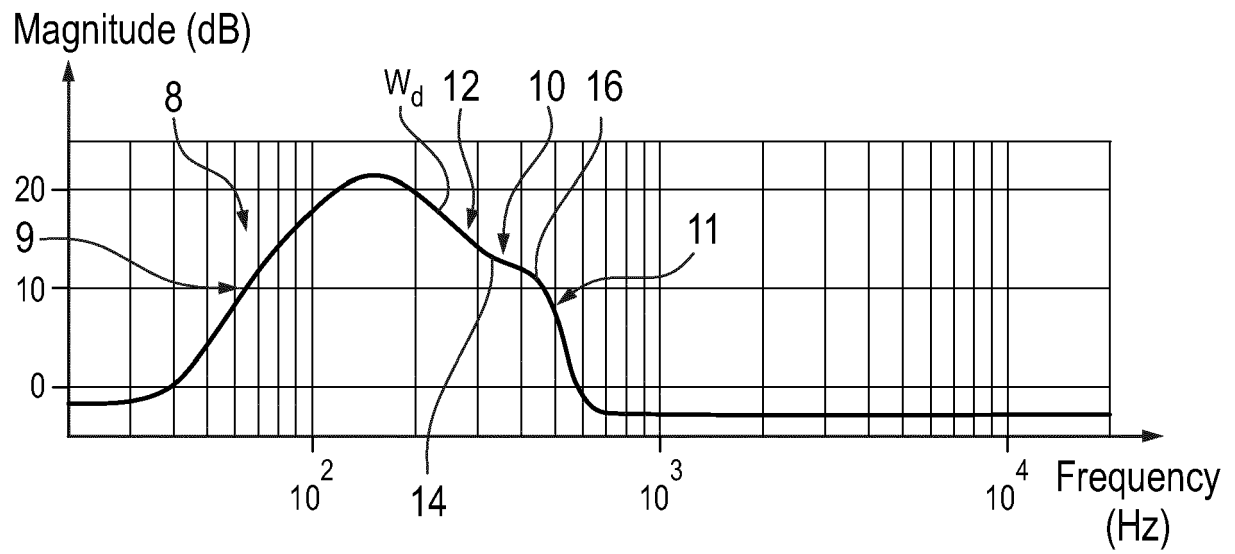


Fig. 4