

(19)



(11)

EP 4 002 875 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
25.05.2022 Patentblatt 2022/21

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
H04R 1/10 (2006.01) H04R 29/00 (2006.01)
G10K 11/178 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **21207962.8**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
H04R 1/1083; G10K 11/17815; G10K 11/17817;
G10K 11/17854; H04R 29/00; G10K 2210/1081;
G10K 2210/3055; G10K 2210/504; H04R 2410/05;
H04R 2460/01

(22) Anmeldetag: **12.11.2021**

(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
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(72) Erfinder:
• **Perkmann, Michael**
1230 Wien (AT)
• **Wöhler, Daniel**
1230 Wien (AT)
• **Kollenz, Ludwig**
1230 Wien (AT)

(30) Priorität: **13.11.2020 EP 20207549**

(74) Vertreter: **Patentanwälte**
Barger, Piso & Partner
Operngasse 4
1010 Wien (AT)

(71) Anmelder: **Austrian Audio GmbH**
1230 Wien (AT)

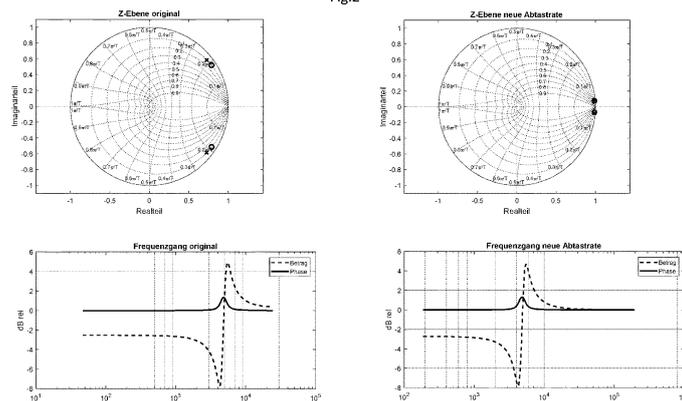
(54) VERFAHREN ZUR ADAPTION VON ANC-KOPFHÖRERN

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Anpassung bzw. Kalibrierung eines ANC-Kopfhörers, der über zumindest einen Signalprozessor verfügt, auf dem zumindest ein ANC-Filter, insbesondere ein IIR-Filter, und dessen Parameter gespeichert sind, das folgende Schritte umfasst:

- a) Aufsetzen des Kopfhörers auf ein Messmittel, beispielsweise einen Kuppler, einen Kunstkopf mit Messmikrofonen, oder einen realen Kopf mit Sondenmikrofonen, enthaltend eine EDV mit einer Datenübertragung,
- b) Vermessen relevanter Übertragungstrecken $x(n)$, $m(n)$ sowie $p(n)$ für Feedforward und $h(n)$ für Feedback, unter Anregen des ANC-Kreises eines Kopfhörers, beispielsweise durch Chirpen oder Rauschen,

- c) Definition zumindest einer Zielfunktion, $-p(n)$ für Feedforward oder $t(n)$ für Feedback, zur Kalkulation der Komplementärfunktion, $f(n)$ für Feedforward oder $i(n)$ für Feedback, zumindest eines Zweigs des ANC-Kreises (Feedforward oder Feedback) des Kopfhörers,
- d) Berechnen zumindest einer Impulsantwort der Komplementärfunktion/en, $f(n)$ für Feedforward und/oder $i(n)$ für Feedback, aus den Messungen der relevanten Übertragungstrecken,
- e) Approximation der Parameter des/der ANC-Filter/s mittels Prony Methode, die zum Erreichen der Komplementärfunktion/en notwendig sind,
- f) Eingeben bzw. Aktivieren der berechneten Parameter im Signalprozessor umfasst.

Fig.2



EP 4 002 875 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Anpassung bzw. Kalibrierung eines ANC-Kopfhörers, entsprechend dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und der WO 2010/049241 A1.

[0002] Diese Druckschrift, entsprechend der US 9,779,714 schlägt vor, dass im Zuge der Herstellung eines ANC-Kopfhörers dieser mit einem aus Versuchen abgeleiteten Filter (entsprechend einem Equalizer) auf einen Kunstkopf mit Mikrofonen aufgesetzt wird, dass das von den Lautsprechern abgestrahlte Signal bei Auftreten (bekannten) äußeren Lärms festgestellt wird, und dass durch Einstellung des Verstärkungspegels des ANC-Mikrofons eine bestmögliche Löschung des Umgebungslärms erzielt wird. Diese Einstellung des Mikrofons wird sodann für die Lebensdauer des Kopfhörers verwendet.

[0003] Trotz der Einfachheit dieses Verfahrens haften ihm einige Mängel an, insbesondere können keinerlei Abweichungen in der Charakteristik vom Versuchshörer berücksichtigt werden. Durch die endgültige Einstellung des Pegels können auch die im Laufe des Lebens eines Kopfhörers auftretenden Änderungen, sei es die Qualität der Abschirmung durch die Kopfhörerschalen bzw. deren Polster, sei es elektronische Drift bei den Verstärkern oder beim Lautsprecher oder beim Mikrofon durch Alterungsprozesse der dabei unbedingt notwendigen, bewegten Membranen etc. berücksichtigt werden.

[0004] Die CN 111 800 694 A zeigt ein Verfahren, zur Anpassung von ANC-Kopfhörern, bei dem die anzupassenden Kopfhörer auf eine Messeinrichtung gesetzt und der ANC-Kreis angeregt wird. Im Anschluss wird eine Filterfunktions-Kalkulation im Frequenzbereich durchgeführt. Auch die US 2011/222696 zeigt ein ähnliches Verfahren zur Anpassung von ANC-Kopfhörern im Frequenzbereich. Nachteilig an diesen Verfahren ist, dass sich diese Art der Signalverarbeitung nicht für alle Anwendungsfälle eignet und dann zu einem erhöhten Rechenaufwand führt.

[0005] Die US 2019/080682 A1 stellt einen entfernten Stand der Technik dar. Hier wird nicht dezidiert auf die Filterberechnung oder die Ermittlung der Parameter zur Konfiguration des ANC Kopfhörers nach erfolgter Messung eingegangen, sondern es wird der Fokus auf das Vermessen selbst gelegt.

[0006] Allgemein kann zum Stand der Technik gesagt werden, dass die Abstimmung von ANC-Kopfhörern durch Messen der Impulsantworten von Prototypen und Bestimmung "mittlerer" (optimierter) Filtercharakteristiken erfolgt, die auf den Signalprozessoren (in der Regel ANC-ICs) entsprechend programmiert werden. Diese Filtercharakteristiken werden bei allen Kopfhörern dieser Serie verwendet. Im Zuge der Herstellung der eigentlichen Produkte wird Stück für Stück die reale Impulsantwort gemessen und es wird die Verstärkung des ANC-Mikrofons bestmöglich an den Unterschied von Messergebnissen und gewünschten Endresultat ange-

passt.

[0007] Unter ANC-Kopfhörer werden in der Anmeldung und den Ansprüchen auch Ohrhörer, sogenannte In-Ear, Earbud, On-Ear und Circumaural-Ear Hörer und auch Hörgeräte aller Art verstanden.

[0008] Es ist Ziel und Aufgabe der Erfindung ein Verfahren anzugeben, das in der Lage ist auch derartige Abweichungen sowie Unterschiede zu der gewünschten, für das jeweilige Einzel-Produkt idealen, Filtercharakteristik zu berücksichtigen.

[0009] Diese Ziele werden erfindungsgemäß durch die im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 angegebenen Kennzeichen erreicht, mit anderen Worten; es wird eine anzustrebende Übertragungsstrecke im Zuge der Entwicklung des Kopfhörers festgelegt, es werden die Übertragungsstrecken des produzierten ANC-Kopfhörers gemessen, aus den Messungen werden Komplementärfilterfunktionen errechnet und mittels der Prony Methode (rekursive) Filter für den Signalprozessor so ermittelt, dass der Kopfhörer die angestrebte (idealen) Übertragungsstrecke aufweist, die so ermittelten Filterkoeffizienten und/oder Verstärkungsfaktoren werden am Signalprozessor gespeichert bzw. aktiviert.

[0010] Detaillierter ausgeführt, umfasst das erfindungsgemäße Verfahren zur Kalibrierung bzw. Anpassung eines ANC-Kopfhörers, der über zumindest einen Signalprozessor verfügt, auf dem zumindest ein ANC-Filter, insbesondere ein IIR-Filter, und dessen Parameter gespeichert sind, folgende Schritte:

a) Aufsetzen des Kopfhörers auf ein geeignetes Messmittel, (beispielsweise einen Kuppler, oder einen Kunstkopf mit Messmikrofonen, oder einen realen Kopf mit Sondenmikrofonen) enthaltend eine analoge oder digitale EDV mit einer Datenübertragung,

b) Vermessung der relevanten Übertragungsstrecken unter Anregen des ANC-Systems (ANC-Kreises) des Kopfhörers, beispielsweise durch Chirpen oder Rauschen,

c) Definition zumindest einer Zielfunktion zur Kalkulation der Komplementärfunktion zumindest eines Zweigs der ANC Anwendung (des ANC-Kreises),

d) Berechnen zumindest einer Impulsantwort der Komplementärfunktion/en aus den Messungen der relevanten Übertragungsstrecken,

e) Approximation der Parameter des/der ANC-Filter/s mittels Prony Methode, die zum Erreichen der Komplementärfunktion/en notwendig sind,

f) Eingeben bzw. Aktivieren der berechneten Parameter im Signalprozessor

[0011] Allgemein gesagt umfasst das erfindungsge-

mäße Verfahren, dass im Zuge der Messung beim fertigen Produkt individuell die Filtercharakteristik geändert und an das jeweilige Einzelprodukt angepasst wird, was durch die Struktur der Signalprozessor ermöglicht ist, weil diese über Bluetooth oder andere drahtlose Verbindungsmöglichkeit verfügen, oder aber über eine galvanische Schnittstelle wie USB oder Ähnliches zugänglich sind. Da die Messergebnisse digital vorliegen und im Regelfall digital verarbeitet werden (ohne dass dies zwingend notwendig wäre) ist es ein Leichtes, über diese Datenübertragungsmöglichkeiten die digitalen Filterkoeffizienten der Signalprozessor wunschgemäß anzupassen.

[0012] Eine derartige Anpassung kann selbstverständlich auch noch nach Jahren am benutzten Produkt vorgenommen werden kann, wenn ein entsprechender Messplatz zur Verfügung steht, um eventuelle Änderungen im akustischen Verhalten durch die eingangs erwähnten Alterungsprozesse auszugleichen.

[0013] Es soll nur kurz darauf hingewiesen werden, dass die angestrebten Filtereigenschaften nicht nur auf eine möglichst vollständige Reduktion der Außengeräusche abgestimmt werden, sondern auch stets die Stabilität der/des ANC-Kreise/s berücksichtigen, um alle Arten von Übersteuerungen und Klirren zu vermeiden, Da Feedback hier empfindlicher ist als Feedforward. Feedback Systeme arbeiten als geschlossener Regelkreis und müssen Stabilitätskriterien erfüllen (Amplitude <0dB bei Phase 360 Grad (Bereich: +/-180) um kein "Heulen" bzw. Übersteuern bei Instabilität zu erzeugen.

[0014] In einer Ausgestaltung der Erfindung werden die so bestimmten Transferfunktionen in Polynome zweiter Ordnung zerlegt, wodurch es möglich wird die bei Signalprozessoren häufig verwendeten biquadratischen Kaskaden anzuwenden.

[0015] Die angeführte EDV mit Datenübertragung ist integraler Teil des Messmittels. Die Messanordnung besteht entsprechend nicht nur aus dem Kuppler, sondern auch einer EDV, die das Signal weiterverarbeiten kann.

[0016] Die Erfindung wird im Folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt

die Fig. 1 den Graphen einer Approximation einer erfindungsgemäß errechneten Impulsantwort (Komplementärfunktion), aus gemessenen Übertragungsstrecken und Zielfunktion, mittels Prony Methode,

die Fig. 2 ein Beispiel eines IIR Filters von 48kHz umgesetzt für 384kHz. Die linke Spalte zeigt das Original, die Rechte die Version bei höherer Abtastrate. Oben sind die Pole und Nullstellen in der komplexen Ebene dargestellt, unten Magnituden-(strichliert) und Phasengang (durchgezogen),

die Fig. 3 das Ergebnis der Abtastratenanpassung der Impulsantwort am Beispiel der mit biquadratischen Filtern (IIR) approximierten Komplementärfil-

terfunktion und

die Fig. 4 die Einzelfunktionen eines Feedback-Systems mit $h(n)$ (links oben), $t(n)$ (links unten) und durch Dekonvolution erhaltene und approximierte Komplementärfilter - Impulsantwort (rechts oben), rechts unten: das Ergebnis der Faltung von Sekundärstrecke und approximiertem Komplementärfilter - Impulsantwort zur Kontrolle der erfolgreichen Syntheseisierung der Zielfunktion.

[0017] Ein Beispiel für das erfindungsgemäße Verfahren bzw. das dabei verwendete Optimierungsverfahren (Methode) wird im Folgenden beschrieben:

Die hier erfindungsgemäße Methode verwendet IIR-Filter, da diese deutlich weniger Rechenleistung und Speicher als FIR-Filter bei gleichem Ergebnis bedürfen. Zusätzlich erlauben manche IC's ausschließlich IIR-Filter, sodass diese Methode universell einsetzbar ist. Es kann sich hierbei um ein Feedforward-, ein Feedback- oder ein Hybrid-System handeln. Ein Messsystem ermittelt die Impulsantworten der Übertragungsstrecken (Feedforward und Feedback). Dies kann mit allen üblichen Methoden erfolgen, etwa durch Anregung mittels Chirps oder Rauschen ist aber nicht auf diese beschränkt. Zu den ermittelten Impulsantworten der passiven Strecken müssen noch die bekannten Charakteristiken der Mikrophone und des Treibers, die ja vorliegen, hinzugefügt werden (mittels Konvolution). Somit ist die Impulsantwort der Feedforward-Strecke gegeben über:

$$x(n) * m(n) * f(n) = -p(n)$$

[0018] Wobei $x(n)$ der Übertragungsstrecke des Lautsprechers des ANC-Kopfhörers zum Auslöschungspunkt des Feedforward ANC Systems (Kupplermikrofon, Kunstkopfmikrofon, realer Kopf mit Sondenmikrofon, o.Ä.) und $m(n)$ der Übertragungsstrecke zwischen externem Lautsprecher (Noise Source) zum Feedforwardmikrofon entsprechen. Die Zielfunktion $p(n)$ entspricht bei einem Feedforward-System der passiven Übertragungsstrecke zum Auslöschungspunkt. Aus den vorliegenden drei Strecken $x(n)$, $m(n)$ und $p(n)$ kann also analog zum Feedback-System die angestrebte Komplementärfunktion $f(n)$ durch Dekonvolution errechnet und anschließend nach dem erfindungsgemäßen Verfahren approximiert werden. Der Auslöschungspunkt beschreibt, wie im Stand der Technik üblich, den Punkt, an dem die durch das ANC-System erzeugte Gegenwelle die von außen in den Kopfhörer eindringende Schallwelle auslöscht.

[0019] Die Feedback-Strecke wird ermittelt, indem eine Ziel-Impulsantwort $t(n)$ durch Dekonvolution erreicht wird.

$$h(n) * i(n) = t(n)$$

[0020] Die gemessene reale Impulsantwort $h(n)$ die auch als Sekundärstrecke (entsprechend der Übertragungsstrecke zwischen ANC-Kopfhörer, Lautsprecher und Feedbackmikrofon) bezeichnet wird, gefaltet mit der errechneten Impulsantwort $i(n)$ ergibt die Zielfunktion $t(n)$. Somit sind die Impulsantworten für Feedforward und Feedback gegeben. Die Einzelfunktionen sowie die resultierende bereits approximierten Komplementärfilter-Impulsantwort sind in Fig.4 dargestellt.

[0021] Eine gegebene Impulsantwort kann als FIR-Filter der Länge der Impulsantwort betrachtet werden, wobei die Werte der einzelnen Samples als Filterkoeffizienten fungieren. Die Übertragungsfunktion hat somit die Form

$$H(z) = \sum_{i=0}^M b_i z^{-i}$$

[0022] Ein IIR-Filter hingegen hat die Form

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^N a_i z^{-i}}$$

[0023] Ein gegebener integrierter Schaltkreis hat aufgrund von Limitationen der Hardware nicht notwendigerweise die Möglichkeit ein FIR-Filter für ANC zu nutzen (solche Filter benötigt zu viele Taps). Mit einem IIR-Filter ist es hingegen schon möglich, da die rückgekoppelte Struktur weniger Taps benötigt. Daher ist es vorteilhaft die gegebene Impulsantwort durch ein IIR-Polynom zu approximieren.

[0024] Es gibt hierzu verschiedene Möglichkeiten: In einer Ausführungsform wird die Prony-Methode, in Fig. 1 dargestellt, verwendet, welche die gegebene Impulsantwort durch exponential-gedämpfte Kosinusschwingungen approximiert. Der Vorteil der Prony Methode liegt darin, dass im Gegensatz zur Filterapproximation im Frequenzbereich wo das Ergebnis FIR Filter sind welche dann weiterer Methoden bedürfen um IIR Polynome zu erzeugen, als Ergebnis ein IIR Polynom liefert. Die Prony Methode approximiert Impulsantworten; das bedeutet es muss im Zeitbereich gearbeitet werden. Über die Messung sind bereits Impulsantworten als Übertragungsstecken gegeben wodurch es zudem nahe liegt den Zeitbereich nicht zu verlassen. Die Approximation des ANC-Filters in Punkt e) des Verfahrensablaufs entspricht der Überführung der idealen FIR Impulsantwort des Filters in eine IIR Filter-Funktion mittels Prony-Methode.

$$\hat{f}(t) = \sum_{i=1}^M A_i e^{\sigma_i t} \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

[0025] Durch die Approximation besitzt die ermittelte Transferfunktion mehr Koeffizienten als benötigt: ANC-Filter werden üblicherweise bis 2kHz definiert, da oberhalb eine gute passive Dämpfung erwartet werden kann.

5 Optional kann die Ordnung der Transferfunktion reduziert werden.

[0026] Impulsantworten werden im Regelfall bei einer geringeren Abtastrate als im ANC-System verwendet aufgezeichnet. Üblich sind 44.1 oder 48kHz, während ein ANC-System eher 192 oder 384kHz getaktet ist. Das ermittelte IIR-Filter muss somit von z.B. 48kHz auf 384kHz skaliert werden, wobei der Frequenzgang absolut gesehen (in Hz) gleich bleiben soll (in einem relevanten Bereich).

15 **[0027]** Die Skalierung eines IIR-Filters ist nicht offensichtlich, da sich die Transferfunktion ändern muss. Die hier vorgeschlagene Methode nutzt Pole und Nullstellen der

20 **[0028]** Transferfunktion $H(z)$. Der Einheitskreis auf der z -Ebene bildet den Frequenzgang ab (welcher auch über die Fourier Transformation ermittelt werden kann), da dort

$$25 \quad z = e^{j\omega}$$

[0029] An der (kartesischen) Koordinate $1 + 0j$ ist der DC-Anteil (0Hz) zu finden, während an $-1 + 0j$ die halbe Abtastfrequenz zu finden ist (Nyquist-Frequenz). Für 30 48kHz ist die Nyquist Frequenz 24kHz. In Radiant handelt es sich um π , also den halben Einheitskreis. Für die höhere Abtastrate (384kHz) ist π gleich 192kHz. Das bedeutet im selben Bereich in Radiant befindet sich mehr Bandbreite (in Hz).

35 **[0030]** Wird eine Gerade vom Ursprungspunkt ($0 + 0j$) durch einen Pol (oder eine Nullstelle) bis zu Einheitskreis gezogen ist zunächst deren Winkel (bezogen auf die Abszisse) für die niedrige Abtastrate ersichtlich. Der Punkt am Einheitskreis entspricht einer Frequenz f in Hz.

$$f = \frac{\varphi f_s}{\pi 2} \text{ in Hz}$$

45 **[0031]** Der Punkt am Einheitskreis in Hz kann für die erhöhte Abtastrate in korrespondierenden Radianten umgerechnet werden.

$$50 \quad \varphi_u = \frac{f}{0.5 f_{su}} \pi$$

[0032] Somit ist der Winkel bekannt um welchen die Pole und Nullstellen gedreht werden müssen um die 55 Transferfunktion für die höhere Abtastrate zu skalieren. Zusätzlich müssen die Dämpfungsfaktoren angepasst werden. Die Linien konstanter Dämpfung der s -Ebene werden durch entsprechende Abbildung (bilineare

Transformation, Impuls Invarianz, o.ä.) zu spiralförmigen Wurzel-Ortskurve auf der z-Ebene. Vom ursprünglichen Punkt eines Pols oder einer Nullstelle muss die Orts-Wurzel-Funktion zum DC-Punkt ermittelt werden. Die neue Position eines Pols/ Nullstelle ist an der Intersektion zwischen Orts-Wurzel-Funktion und des neuen Winkels für die höhere Abtastrate. Das Ergebnis dieser Anpassung ist in Fig.2 (rechts oben und unten) dargestellt.

[0033] Sonderregelungen des Vorgehens sind nötig für Pole/ Nullstellen welche an der Nyquist-Frequenz für die niedrige Abtastrate liegen: Da diese für die höhere Abtastrate wandert (von π zu $< \pi$) müssen diese Pole/Nullstellen mitwandern und entlang der Abszisse gespiegelt werden um ein reellwertiges Filter zu erhalten. In Zuge dieses Vorgangs können mehr Nullstellen als Pole entstehen, was zu einer nicht wohldefinierten Übertragungsfunktion führt. Es sind Pole nahe des Ursprungspunkts hinzuzufügen, so dass deren Einfluss gering ist aber die Übertragungsfunktion wohldefiniert wird. Es ist bekannt, dass ein Polynom mit mehr Koeffizienten im Zähler als im Nenner nicht wohldefiniert ist, da es anti-kausal wäre.

[0034] Nach skalieren der Übertragungsfunktion, entsprechend der Fig. 3, ist diese in Funktionen 2. Ordnung zu zerlegen (biquadratische Kaskade), da diese meist in Ics umgesetzt werden kann und auch stabiler sind. Optional kann die Skalierung auf nach der Zerlegung in bi-quadratische Filter erfolgen. Die Zerlegung kann mittels Partialbruchzerlegung erfolgen.

[0035] Die so gewonnenen Koeffizienten für bi-quadratische, somit rekursive, Filter können in eine Differenzgleichung umgewandelt und in einem passenden integrierten Schaltkreis verwendet werden. Da die meisten ANC Ics in Ihrer Programmieroberfläche/Entwicklungs-umgebung die Möglichkeit haben, Filterkoeffizienten i.d.R. IIR manchmal auch FIR direkt einzugeben, ist dies problemlos durchführbar.

[0036] Dabei wird beispielsweise im Signalprozessor eines Feedback ANC Systems das Feedback Filter mit den Koeffizienten, der nach obiger Beschreibung approximierten, errechneten Komplementärfunktion, programmiert. Diese Programmierung wird in der Regel über die Entwicklungsumgebung der jeweiligen Signalprozessoren (ANC Ics) oder durch einspielen einer mit den Koeffizienten versehenen Firmware über die bereits erläuterten Methoden bewerkstelligt.

[0037] Die Erfindung kann verschiedentlich abgewandelt und verändert werden, so kann das Messmittel neben den genannten Möglichkeiten eines Kunstkopfes, etc. jede andere Anordnung von Mikrofonen haben bzw. daraus bestehen, solange nur die benötigten, dem Fachmann in Kenntnis der Erfindung geläufigen, Daten erfasst werden.

[0038] Ob zu Beginn des Verfahrens im Signalprozessor ein beliebiges oder ein aufgrund der Erfahrung schon in etwa angepasstes Filter konfiguriert ist, spielt letztlich keine Rolle, da ein nochmaliges Durchlaufen des Verfahrens vom Schritt b) an, eventuell mit weiteren Wie-

derholungen, zu einem raschen Erreichen des optimal erreichbaren Zustandes führt.

[0039] Da sich ANC Kopfhörer während Ihres Lebenszyklus verändern und sich dadurch ihre relevanten Übertragungsstrecken ändern können, kann eine Neukalibrierung sinnvoll sein. Die Aussparung von a) aus dieser Verfahrenswiederholung kommt daher, dass die Wiederholung auch unmittelbar nach der Erstanpassung erfolgen kann, sich die Kopfhörer daher noch auf dem Messkopf befinden.

[0040] Dies ist insbesondere bei der Endanpassung einer ganzen Serie von Kopfhörern spürbar, bei denen von einer Anfangskonfiguration ausgegangen werden kann, die beispielsweise durch den ersten erfindungs-gemäß konfigurierten Kopfhörer erreicht ist.

[0041] Auch Adjustierungen von bereits länger benutzten Kopfhörern sind problemlos möglich.

[0042] Ausgestaltungen der Erfindung sehen beispielsweise vor, dass im Schritt b) die Messung der Übertragungsstrecken digital mit der Abtastrate des Messsystems erfolgt, dass der ANC-Kopfhörer eine, vom digitalen Signalprozessor gegebene, Taktrate aufweist, dass die Taktrate höher ist als die Abtastrate und dass die/der approximierten ANC Filter im Verhältnis der Abtastrate zur Taktrate skaliert werden, wobei der Frequenzgang der/des approximierten Komplementärfilter/s absolut, in Hertz, betrachtet gleich bleibt. Das skalieren bereits approximierter ANC-Filter, entsprechend dem Verhältnis zwischen Taktrate des arbeitenden Signalprozessors im ANC-Hörer und Abtastrate des Messsystems bedeutet in anderen Worten, dass die Koeffizienten der IIR Filter-Funktion numerisch abgeändert werden, um mit der höheren Taktrate des Signalprozessors einen identen Frequenzgang zu erzeugen.

[0043] Eine weitere Ausgestaltung sieht vor, dass im Schritt e) die Ordnung des/der approximierten Komplementärfilter/s höher ist/sind als der/die Signalprozessor(en) verarbeiten kann(können) und dass die Ordnung der/des approximierten Komplementärfilter/s passend für die Leistung des(der) Signalprozessors(en) reduziert wird.

[0044] Die Notwendigkeit zur Reduzierung der Ordnung ergibt sich aus dem Umstand, dass die Verarbeitung der Signalprozesse im Kopfhörer im Betrieb in Echtzeit erfolgen muss, da ANC nur für Echtzeitanwendungen sinnvoll ist. Digitale Signalprozessoren (DSP) verfügen über der Fachperson bekannte hardwaregebundene Eigenschaften, die Einschränkungen darstellen, welche bei Ihrer Benutzung beachtet werden müssen (z.B. Rechenoperationen/Zyklus, dem Prozessor immanente Taktraten, Energiebedarf, usw.). Daraus ergeben sich unzählige Gründe oder Einschränkungen warum Signalverarbeitungsprozesse (z.B. Filter) nicht in Echtzeit durchgeführt werden könnten. Die Aufzählung ist daher nicht als abschließend anzusehen. Die Auslastung der Signalprozessoren kann selbstverständlich neben der reinen Erzeugung eines ANC-Signals auch von anderen Faktoren, wie etwa der Verarbeitung des abzugebenden

Audiosignals (etwa Musik), oder Bluetoothstreaming abhängen. Dabei handelt es sich jedoch um keinen zwingenden Umstand. Es wäre beispielsweise möglich mehrere Signalprozessoren in einem Kopfhörer zu verbauen, wobei jeder eine eigene Aufgaben übernimmt. Der Nachteil daran liegt auf der Hand und findet sich in höheren Kosten und einem größeren Verbrauch an Bauraum und/oder Energie. Da Kopfhörer traditionell mit einem begrenzten Platzangebot in ihrem Gehäuse auskommen müssen ist es vorteilhaft, aber nicht zwingend nötig, einem Signalprozessor mehrere Aufgaben zu übertragen. Aufgrund dieser Möglichkeit der Anpassung der Systemressourcen auf Basis der Zuteilung mehrerer Aufgaben an einen Signalprozessor kann es daher nötig werden die Ordnung des/der approximierten Komplementärfilter/s an den/die Signalprozessor(en) anzupassen.

[0045] Das IIR-Polynom bzw. die IIR-Kaskade 2ter Ordnung sind bereits eine Filterimplementierung. Die Ordnung wird reduziert falls der Signalprozessor nicht genügend Leistung besitzt um z.B. eine Kaskade aus 16 Filtern 2ter Ordnung auszuführen. Hier ist auf z.B. 8 Filter 2ter Ordnung zu reduzieren. Diese Reduktion muss so geschehen, dass die ANC-Performance nicht wesentlich beeinträchtigt wird. Dies ist weder trivial noch offensichtlich da bereits geringste Abweichungen vom Ideal zu starken negativen Effekten auf die Schallunterdrückung führt. Das wiederum ist jedem Fachmann auf dem Gebiet geläufig und wird vorausgesetzt.

[0046] Da digitale Signalprozessoren für ANC Anwendungen in Echtzeit arbeiten müssen, um Schallunterdrückung überhaupt möglich zu machen arbeiten diese bei weit höheren Taktraten (gängig sind z.B. max. 768kHz, typisch 384kHz) als typische Akustik-Messsysteme (typisch 48kHz). Routinemäßige Umrechnung von Filtern für eine höhere Abtastrate ist bei bekannten Entwurfverfahren möglich und dem Fachmann bekannt. Hier jedoch liegt eine Filterkaskade vor, die nicht einer bekannten Entwurfsmethode folgt (wie im Text ausgeführt mittels Approximation der Impulsantwort über die Prony-Methode), daher ist die Skalierung der Filter nicht mehr offensichtlich durchführbar. Die Pol/Nullstellen Positionen der IIR Filterpolynome, welche basierend auf den z.B. mit 48kHz gesampelten Übertragungsstrecken errechnet werden, dürfen sich beim Upsampling in Ihrer Position bezüglich der natürlichen Frequenz des Filters nicht verschieben da ansonsten die Filtercharakteristik nicht mehr zur benötigten Komplementärfunktion passt. Wohl aber müssen die Pole und Nullstellen auf der z-Ebene passend zur höheren Abtastrate des ANC-Systems abgeändert werden; so dass die Charakteristik der Filterkaskade bezüglich ihrer natürlichen Frequenz erhalten bleibt. Dabei treten unterschiedliche Problemstellungen auf: Behandlung von Sonderfällen wie Pole/Nullstellen auf der reellen Achse (0 bzw. π) welche bei 0 rad/s ebenso verschoben werden müssen um die Charakteristik beizubehalten. Desweiteren bei π rad/s: Hier werden die Pole/Nullstellen von der Achse wegbewegt, müssen gespiegelt werden um ein reellwertiges Filter

beizubehalten. All dies hat Einfluss auf Magnituden- und Phasengang der Filterkaskade und muss entsprechend kompensiert werden. Dieses Taktraten Anpassung ist aus diesem Grund maßgeblich für die Qualität des ANC's.

[0047] Die beschriebene Ermittlung, ob eine Reduzierung der Komplexität erforderlich ist wird nach der verfahrensgemäßen Messung von der bedienenden Fachperson oder einem entsprechenden Algorithmus getroffen. Diese Entscheidung muss nicht in Echtzeit geschehen, nachdem die Speicherung des Polynoms nicht zeitsensibel ist, da die Anpassung vor Verkauf des Kopfhörers geschieht. Auf diese Art kann gewährleistet werden, dass das ANC-System später seinerseits in Echtzeit agieren kann.

[0048] Um die Erfindung mit Blick auf die Figuren noch einmal zu verdeutlichen wird hiermit festgehalten, die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung bzw. Anpassung eines ANC-Kopfhörers der über zumindest einen Signalprozessor verfügt, auf dem zumindest ein ANC-Filter, insbesondere ein IIR-Filter, und dessen Parameter gespeichert sind, das folgende Schritte umfasst:

a) Aufsetzen des Kopfhörers auf ein Messmittel, beispielsweise einen Kuppler, einen Kunstkopf mit Messmikrofonen, oder einen realen Kopf mit Sondenmikrofonen, enthaltend eine EDV mit einer Datenübertragung,

b) Vermessen relevanter Übertragungsstrecken $x(n)$, $m(n)$ sowie $p(n)$ für Feedforward und $h(n)$ für Feedback, unter Anregen des ANC-Kreises eines Kopfhörers, beispielsweise durch Chirpen oder Rauschen, dadurch gekennzeichnet, dass es weiters die Schritte

c) Definition zumindest einer Zielfunktion, $-p(n)$ für Feedforward oder $t(n)$ für Feedback, zur Kalkulation der Komplementärfunktion, $f(n)$ für Feedforward oder $i(n)$ für Feedback, zumindest eines Zweigs des ANC-Kreises (Feedforward oder Feedback) des Kopfhörers,

d) Berechnen zumindest einer Impulsantwort der Komplementärfunktion/en, $f(n)$ für Feedforward und/oder $i(n)$ für Feedback, aus den Messungen der relevanten Übertragungsstrecken,

e) Approximation der Parameter des/der ANC-Filter/s mittels Prony Methode, die zum Erreichen der Komplementärfunktion/en notwendig sind,

f) Eingeben bzw. Aktivieren der berechneten Parameter im Signalprozessor umfasst.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Kalibrierung bzw. Anpassung eines ANC-Kopfhörers der über zumindest einen Signalprozessor verfügt, auf dem zumindest ein ANC-Filter, insbesondere ein IIR-Filter, und dessen Parameter gespeichert sind, das folgende Schritte umfasst:
 - a) Aufsetzen des Kopfhörers auf ein Messmittel, beispielsweise einen Kuppel, einen Kunstkopf mit Messmikrofonen, oder einen realen Kopf mit Sondenmikrofonen, enthaltend eine EDV mit einer Datenübertragung, 5
 - b) Vermessen relevanter Übertragungstrecken $x(n)$, $m(n)$ sowie $p(n)$ für Feedforward und $h(n)$ für Feedback, unter Anregen des ANC-Kreises eines Kopfhörers, beispielsweise durch Chirpen oder Rauschen, 10
 - dadurch gekennzeichnet, dass** es weiters die Schritte 15
 - c) Definition zumindest einer Zielfunktion, $-p(n)$ für Feedforward oder $t(n)$ für Feedback, zur Kalkulation der Komplementärfunktion, $f(n)$ für Feedforward oder $i(n)$ für Feedback, zumindest eines Zweigs des ANC-Kreises (Feedforward oder Feedback) des Kopfhörers, 20
 - d) Berechnen zumindest einer Impulsantwort der Komplementärfunktion/en, $f(n)$ für Feedforward und/oder $i(n)$ für Feedback, aus den Messungen der relevanten Übertragungstrecken, 25
 - e) Approximation der Parameter des/der ANC-Filter/s mittels Prony Methode, die zum Erreichen der Komplementärfunktion/en notwendig sind, 30
 - f) Eingeben bzw. Aktivieren der berechneten Parameter im Signalprozessor umfasst. 35
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Schritt b) die Messung der Übertragungstrecken digital mit einer Abtastrate des Messsystems erfolgt, dass der ANC-Kopfhörer einen digitalen Signalprozessor welcher eine gegebene Taktrate aufweist, dass die Taktrate höher ist als die Abtastrate und dass die/der bereits approximierten/n ANC-Filter im Verhältnis der Abtastrate zur Taktrate skaliert werden, wobei der Frequenzgang von (einem) approximierten Komplementärfilter(n) absolut, in Hertz, betrachtet gleich bleibt. 40
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Schritt e) die Ordnung eines Polynoms des/der approximierten Komplementärfilter/s höher ist/sind als der/die Signalprozessor(en) in Echtzeit verarbeiten kann(können) und dass die Ordnung der/des approximierten Komplementärfilter/s passend für die Leistung des(der) Signalprozessors(en) reduziert wird. 45
4. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** es zur Kontrolle und/oder genaueren Kalibrierung ab Schritt b) wiederholt wird. 50
5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Kopfhörer einer aus einer Produktionsserie ist, bei der die ursprünglichen Parameter des ANC-Filters aufgrund vorhergehender Tests eingegeben bzw. aktiviert sind, die dann durch die Wiederholung des Verfahrens im Laufe der Lebenszeit des Kopfhörers angepasst werden. 55

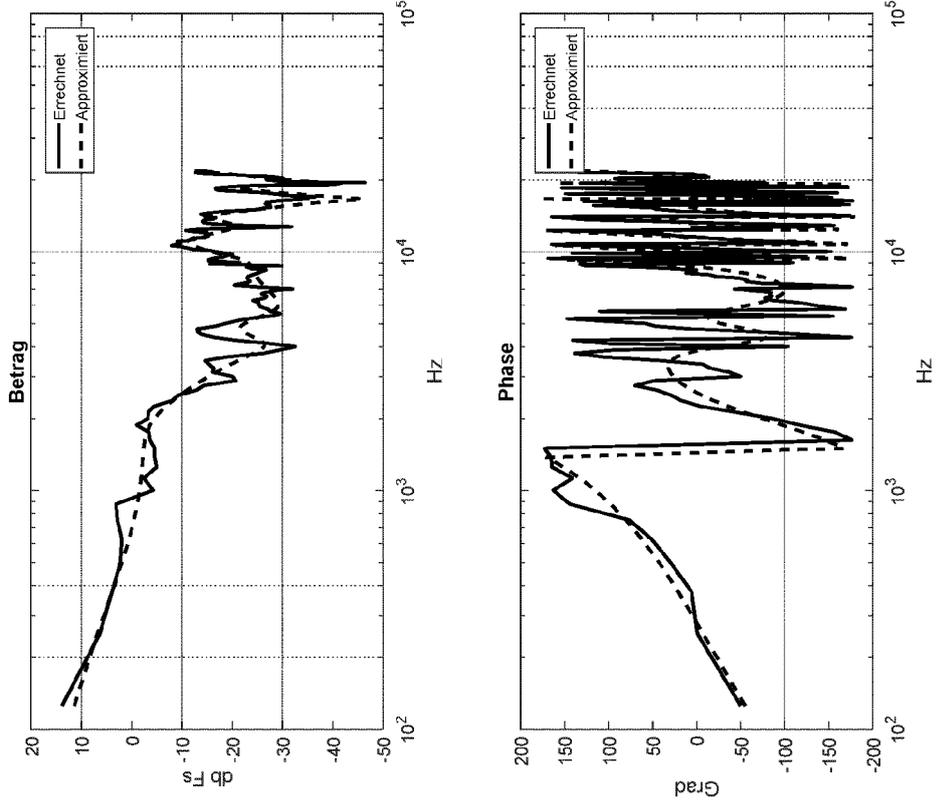


Fig.1

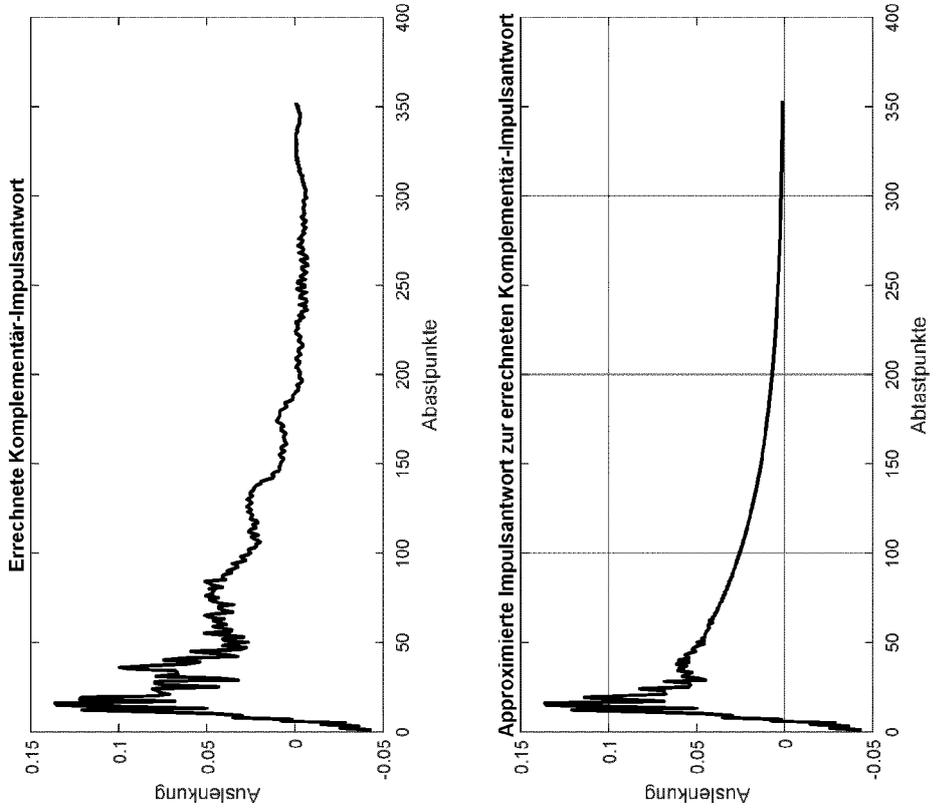


Fig.2

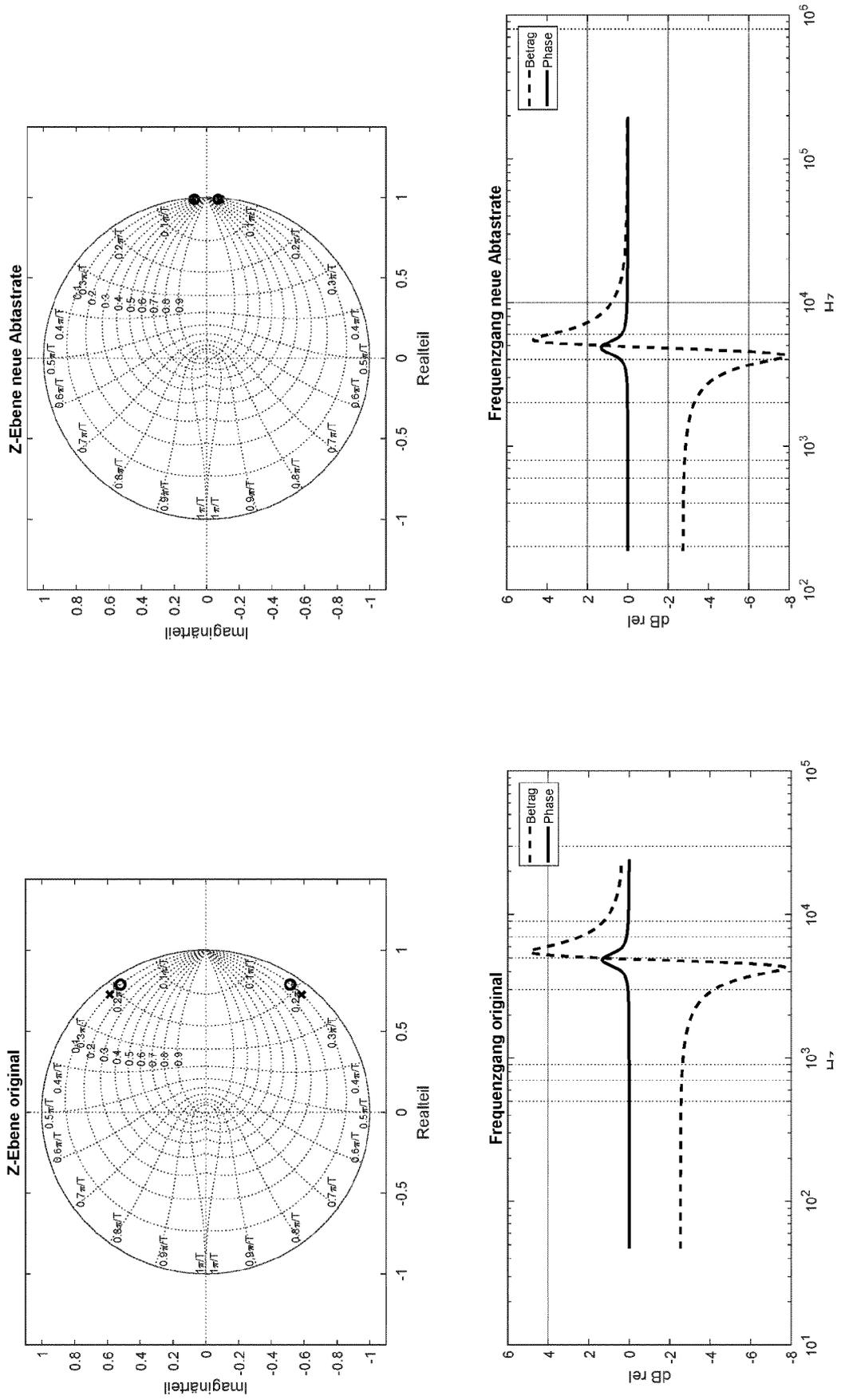


Fig.3

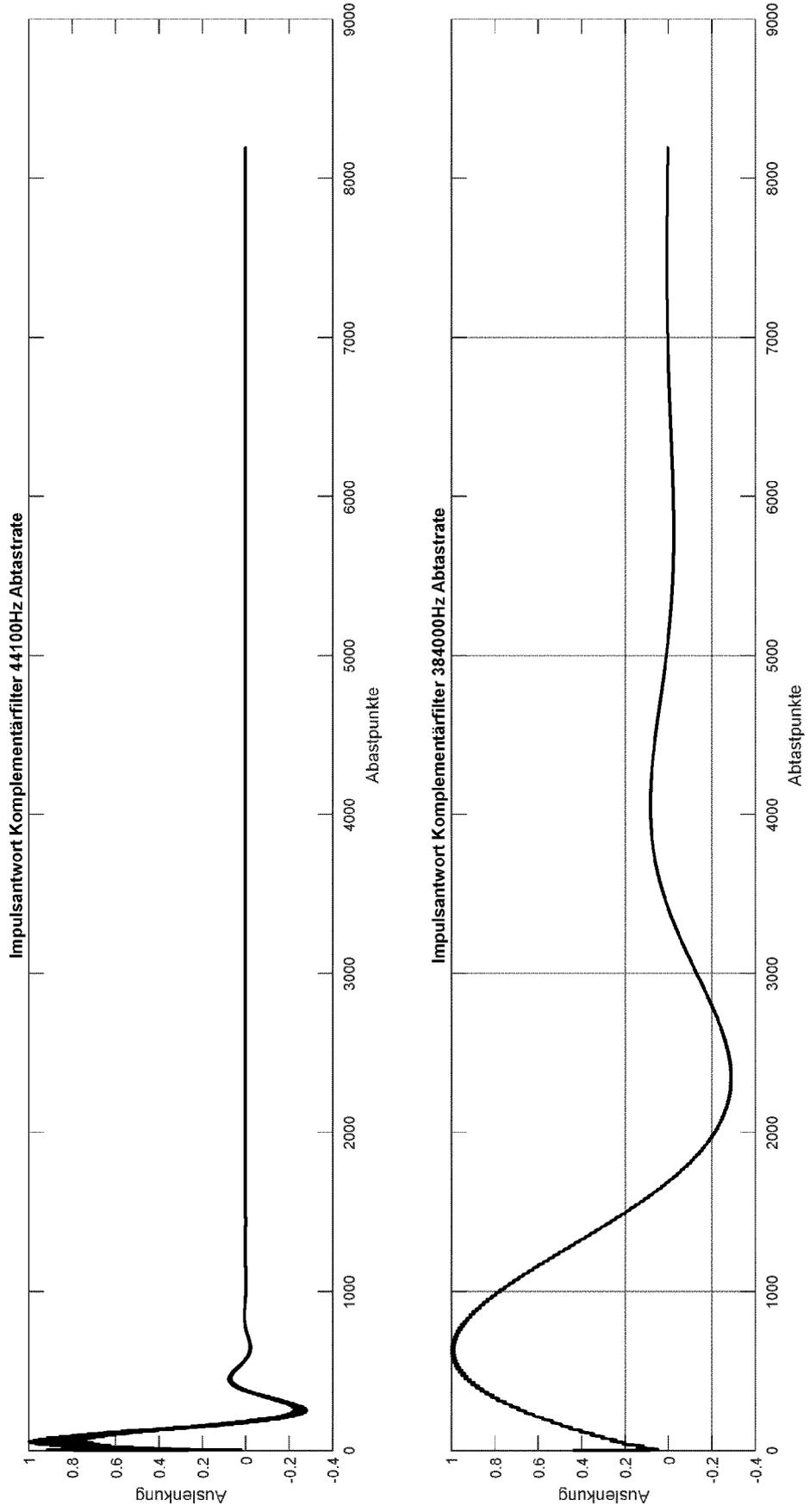
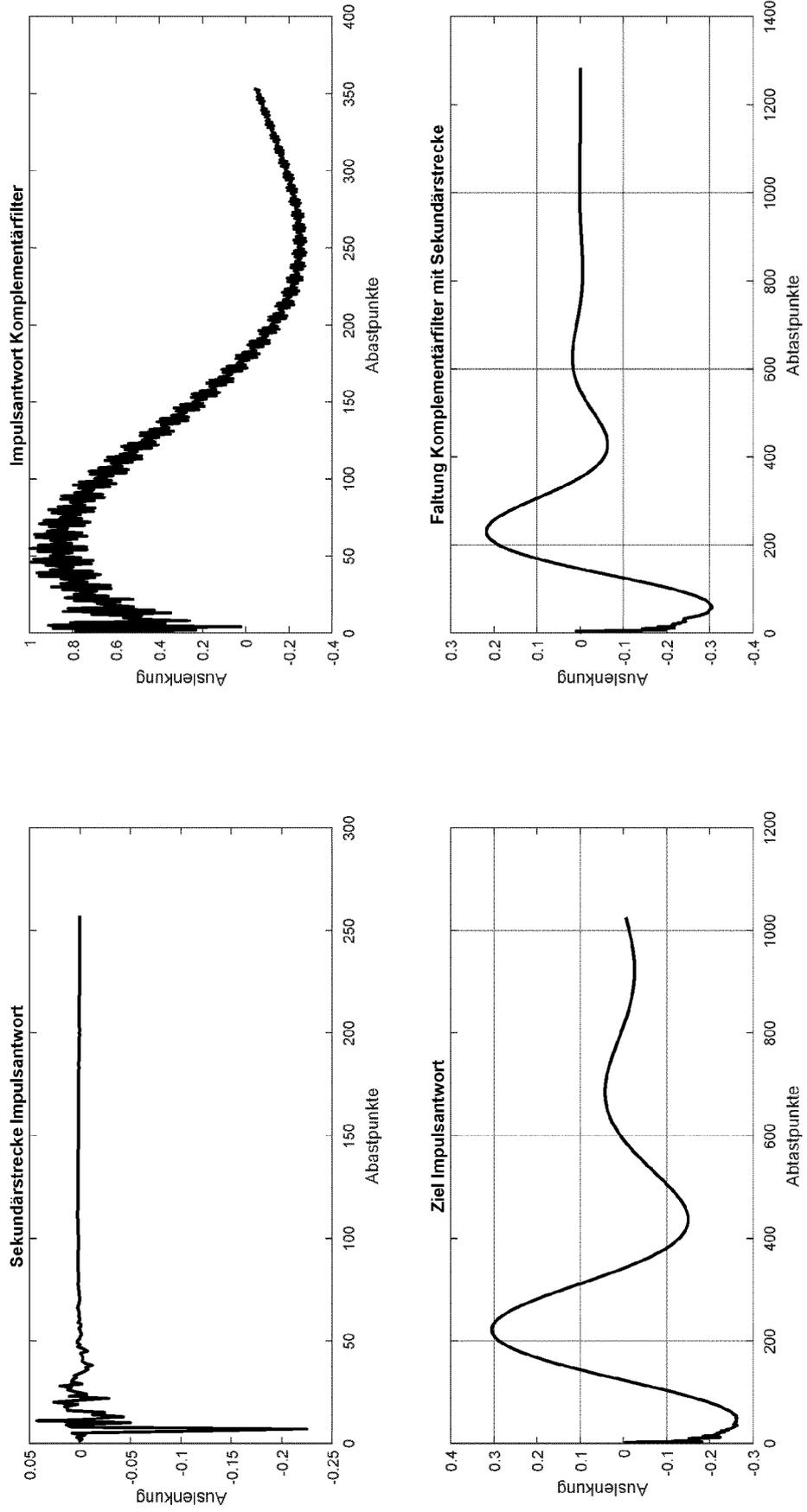


Fig.4





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 21 20 7962

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	CN 111 800 694 A (SHENZHEN HORN AUDIO CO LTD) 20. Oktober 2020 (2020-10-20) * das ganze Dokument * -----	1-5	INV. H04R1/10 H04R29/00 G10K11/178
X	US 2011/222696 A1 (BALACHANDRAN NIKHIL [US] ET AL) 15. September 2011 (2011-09-15) * das ganze Dokument * -----	1-5	
X	US 2019/080682 A1 (DARLINGTON PAUL [CH] ET AL) 14. März 2019 (2019-03-14) * das ganze Dokument * -----	1-5	
A	Smith Julius O.: "Filter Design by Minimizing the L2 Equation-Error Norm", Introduction to Digital Filters: with Audio Applications, 2007, XP055901502, Gefunden im Internet: URL:https://www.dsprelated.com/freebooks/filters/Filter_Design_Minimizing_L2.html [gefunden am 2022-03-15] * das ganze Dokument * -----	1-5	
1 Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
Recherchenort Den Haag			Prüfer Bücker, Martin
Abschlußdatum der Recherche 15. März 2022			
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 21 20 7962

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

15-03-2022

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
CN 111800694 A	20-10-2020	KEINE	

US 2011222696 A1	15-09-2011	CN 103026247 A	03-04-2013
		JP 2013523014 A	13-06-2013
		TW 201202676 A	16-01-2012
		US 2011222696 A1	15-09-2011
		WO 2011115836 A2	22-09-2011

US 2019080682 A1	14-03-2019	CN 108781324 A	09-11-2018
		EP 3430818 A1	23-01-2019
		US 2019080682 A1	14-03-2019
		WO 2017158325 A1	21-09-2017

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

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

- WO 2010049241 A1 [0001]
- US 9779714 B [0002]
- CN 111800694 A [0004]
- US 2011222696 A [0004]
- US 2019080682 A1 [0005]