

(19)



(11)

EP 2 441 274 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
09.08.2017 Patentblatt 2017/32

(51) Int Cl.:
H04R 3/04 (2006.01) H04S 1/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **10730695.3**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/DE2010/000571

(22) Anmeldetag: **21.05.2010**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2010/142262 (16.12.2010 Gazette 2010/50)

(54) VERFAHREN ZUM BESTIMMEN EINER GEMITTELTEN FREQUENZABHÄNGIGEN ÜBERTRAGUNGSFUNKTION FÜR EIN GESTÖRTES LINEARES ZEITINVARIANTES SYSTEM, AUSWERTEVORRICHTUNG SOWIE COMPUTERPROGRAMMPRODUKT

METHOD FOR DETERMINING AN AVERAGED FREQUENCY DEPENDENT TRANSFER FUNCTION FOR A DISTURBED LTI-SYSTEM, EVALUATION UNIT AND COMPUTER PROGRAM

PROCÉDÉ DE DÉTERMINATION D'UNE FONCTION DE TRANSFERT À MOYENNE DÉPENDANT DE LA FRÉQUENCE POUR UN SYSTÈME D'INVARIANCE DE TEMPS LINÉAIRE (LTI) PERTURBÉ, UNITÉ D'ÉVALUATION ET PROGRAMME D'ORDINATEUR

(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 SE SI SK SM TR

(74) Vertreter: **Bittner, Thomas L. Boehmert & Boehmert Anwaltspartnerschaft mbB Pettenkoferstrasse 22 80336 München (DE)**

(30) Priorität: **11.06.2009 DE 102009025117**

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A1- 0 505 949 US-A- 4 628 530

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
18.04.2012 Patentblatt 2012/16

(73) Patentinhaber: **SDA Software Design Ahnert GmbH 13189 Berlin (DE)**

- **AHENRT, FEISTEL, MIRON, FINDER:** "Software-based Live sound Measurements, Part 2" AUDIO ENGINEERING SOCIETY CONVENTION PAPER, 123RD CONVENTION, 7304, 5. Oktober 2007 (2007-10-05), - 8. Oktober 2007 (2007-10-08) Seiten 1-14, XP002602283 New York
- **Thomas, J.B.:** "Using the coherence function as a means to improve frequency domain least squares system identification" 30. März 2007 (2007-03-30), Department of Electrical Engineering and Computer Science, Ohio University, XP002602284 Seite 39
- **BROERSEN, P.:** "A comparison of transfer function estimators", IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, vol. 44, no. 3, 3 June 1995 (1995-06-03), pages 657-661, XP010121750,

- (72) Erfinder:
- **FEISTEL, Stefan 10409 Berlin (DE)**
 - **MIRON, Alexandru Radu 10967 Berlin (DE)**
 - **AHNERT, Wolfgang 13125 Berlin (DE)**
 - **FEISTEL, Rainer 18069 Lambrechtshagen (DE)**

EP 2 441 274 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein gestörtes lineares zeitinvariantes System, eine Auswertevorrichtung sowie ein Computerprogrammprodukt.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Bei der praktischen Messung von vielen linearen, zeitinvarianten Systemen spielen vorhandene Störgeräusche und kurzzeitige Fluktuationen eine große Rolle. Sie begrenzen die mögliche Qualität des Ergebnisses. Dies ist insbesondere der Fall bei Messungen mit spektral oder zeitlich begrenzten und unterbrochenen Anregungssignalen, zum Beispiel in der Audiotechnik und Akustik mit Sprach- oder Musiksignalen.

[0003] Es sind verschiedene Verfahren bekannt, die zur Verbesserung des Ergebnisses bei Messungen vorgeschlagen wurden:

- Es wird über mehrere Messungen gemittelt, dadurch erhöht sich der Signal-Rausch-Abstand um 3 dB je Verdopplung der Anzahl von Messungen, wenn das Störgeräusch nicht korreliert ist. Der Nutzer kann dabei wählen, ob eine komplexe Mittelwertbildung oder eine Mittelung der Leistungen erfolgen soll. Dies kann je nach Randbedingungen eine weitere Verbesserung zur Folge haben.
- Die statistische Kohärenz wird verwendet, um dem Nutzer frequenzabhängig Aussagen bezüglich der Verwendbarkeit bzw. Gültigkeit der Messung zu erlauben.
- Es können Frequenzbereiche explizit durch Nutzervorgabe der zu verwendenden Filterfunktion herausgefiltert werden. Die so gefilterte Zeitantwort kann dann weiteren Untersuchungen zugeführt werden.
- Es kann eine Frequenzanalyse nach Fenstern der Übertragungsfunktion im Zeitbereich, also der Impulsantwort, vorgenommen werden. Dies erhöht zwar den Signal-Rausch-Abstand durch Ausschluss zeitlich früherer oder späterer Anteile verhindert aber verfahrensbedingt zugleich die Akquisition einer vollständigen Systemantwort.
- Es kann in separater Messung ein mittlerer Störpegel ermittelt werden, der dem Nutzer die Schätzung des bei der tatsächlichen Messung vorhandenen Signal-Rausch-Abstands erlaubt und so die eventuelle Entscheidung weiterer Maßnahmen unterstützt.

[0004] Keine dieser Methoden nimmt genaueren Bezug auf die Verwendung von zeit- oder frequenzmäßig limitierten und zugleich zeit- oder frequenzmäßig variierenden Signalen, wie zum Beispiel Sprache und Musik. Im Gegensatz zur automatisierten Verfahrensweise sind diese Methoden nur als interaktive Werkzeuge für den Nutzer während der Messung zu verstehen. Die Interpretation und richtige Handlungsweise bleibt hierbei weitgehend dem Anwender überlassen.

[0005] Messverfahren verfolgen typischerweise eines der beiden nachfolgenden Ziele: (i) Bestimmung der Übertragungsfunktion bei Anregung des Systems durch die Messapparatur selbst, (ii) Bestimmung des ursprünglichen Eingangssignals in ein System durch annähernde Entfernung der Veränderungen durch das System aus dem Ausgangssignal.

[0006] Aus dem Dokument DE 2 313 141 sind ein Verfahren und eine Anordnung zur Echtzeitermittlung der Übertragungsfunktionen von Systemen bekannt. Bei dem bekannten Verfahren zur Echtzeitermittlung der Übertragungsfunktionen von Systemen ist vorgesehen, dass gleichzeitig die Fouriertransformierten der Eingangs- und der Ausgangsinformationen gebildet werden und diese beiden Transformierten durcheinander dividiert werden.

[0007] Im Dokument DE 10 2006 004 105 A1 sind eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Messgrößenaufbereitung offenbart. Ein Messgrößenumformer wird eingesetzt, um Messgrößen in Ausgangssignale umzusetzen.

[0008] Das Dokument US 4,628,530 betrifft eine Schaltungsanordnung zur automatischen Entzerrung von elektrischen Signalen.

[0009] Das Dokument Ahnert et al., "Software-based Live sound Measurements, Part 2" beschreibt ein softwarebasiertes Verfahren für eine Live-Messung.

[0010] Verschiedene Verfahren zum Bestimmen einer Übertragungsfunktion wurden in Broersen, A comparison of transfer function estimators, IEEE Transactions on instrumentation and measurement, Bd. 44, Nr. 3, 3. Juni 1995, XP 010121750, verglichen.

Zusammenfassung der Erfindung

[0011] Aufgabe der Erfindung ist es, verbesserte Technologien zum Bestimmen der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein gestörtes lineares zeitinvariantes System anzugeben. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein gestörtes lineares zeitinvariantes System nach dem unabhängigen Anspruch 1. Weiterhin sind ein System zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein gestörtes lineares zeitinvariantes System sowie ein Com-

puterprogrammprodukt nach dem unabhängigen Anspruch 7 und 8 geschaffen. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand von abhängigen Unteransprüchen.

[0012] Die Erfindung sieht das Bestimmen der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein lineares zeitinvariantes System mit Hilfe einer Mittelung von frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen vor, die aus Referenzsignalen und diesen zugeordneten Messsignalen mittels Entfaltung bestimmt wurden. In den Mittelungsprozess gehen die zuvor bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen einer jeweils zugeordneten frequenzabhängigen Gewichtung entsprechend ein. Es können unterschiedliche frequenzabhängigen Gewichtungsmethoden angewendet werden.

[0013] Die vorgeschlagenen Techniken ermöglichen die Bestimmung der linearen Übertragungsfunktion unter Verwendung des ursprünglichen Eingangssignals, ohne dieses a priori zu kennen oder dessen Eigenschaften vorauszusetzen.

[0014] Die frequenzabhängige Gewichtung erlaubt insbesondere eine frequenzselektive Behandlung von Störsignalen, wie zum Beispiel Sinustönen, und damit deren Ausschluss, ohne andere Teile des gemessenen Spektrums zu beeinflussen. Im Fall einer blockweisen Bearbeitung, d. h. der Ermittlung und Auswertung mehrerer Übertragungsfunktionen, ist außerdem auch eine Behandlung zeitabhängiger Störungen ermöglicht. Eine blockweise Messung sieht im Sinne der vorliegenden Anmeldung eine Aufnahme und Auswertung mehrerer Sätze von Rohdaten vor, typischerweise sequentiell, wahlweise überlappend. Dementsprechend ist der Block als einzelner Satz von Rohdaten beziehungsweise als einzelne gemessene Übertragungsfunktion zu verstehen. Im Gegensatz dazu sind mehrere Blöcke mehrere solcher Datensätze. Messwerte aus nicht angeregten Frequenzen, wie zum Beispiel bei Sprach- oder Musikanregung können ebenfalls aus der Messung ausgeschlossen werden. Schließlich lässt sich in einer Ausführung beispielsweise ein frequenzabhängiger, minimaler Signal-Rausch-Abstand fordern, der praxisnah zum Beispiel an ein unterschiedliches Verhalten des Systems im Tieffrequenz-Bereich und Hochfrequenz-Bereich angepasst sein kann. Dagegen führt die bekannte Mittelung von Messdaten zur bedingungslosen Aufnahme aller Störsignale in den Mittelwert. Dessen Qualität ergibt sich somit primär aus dem Anteil von Störsignal zu Nutzsignal während der Messung sowie aus der Mittelungsdauer.

[0015] Die Messung des gestörten linear-zeitinvarianten Systems erfolgt in einem interessierenden Spektralbereich. Dieser wird durch eine untere Grenzfrequenz f beschränkt. Änderungen der gemessenen Systemantwort, die innerhalb von Zeitspannen kürzer als etwa $100/f$ erfolgen, werden als Störungen verstanden. Änderungen, die innerhalb von Zeitspannen größer als etwa $100/f$ erfolgen und in der Amplitude kleiner als die Messunsicherheit sind, werden ebenfalls als Störungen verstanden. Änderungen, die innerhalb von Zeitspannen größer als etwa $100/f$ erfolgen und mit einer Amplitude größer als die Messunsicherheit stattfinden, werden als im Verhältnis zum Messprozess langsame Veränderung des Systems verstanden und durch die Messung, wahlweise in Echtzeit, erfasst und abgebildet. Außerdem wird vorausgesetzt, dass bei Anregung mit einem beliebigen Signal für die Systemantwort gilt, dass die Amplitude zeitinvarianter nichtlinearer Anteile um mindestens einen Faktor von etwa 10 unter der Amplitude der linearen Anteile liegt.

[0016] Die Bestimmung der gemittelten Übertragungsfunktion kann in Echtzeit ausgeführt werden. Hierbei werden die Eingänge der Auswerteinrichtung ausgewertet während parallel weitere Daten am Eingang aufgenommen werden.

[0017] Auch eine Nutzung in der Nachbearbeitung kann vorgesehen sein. Hierbei liegen Eingänge analog oder digital als Daten vor und werden in das Messsystem gespielt. Die Filterung kann der Aufnahme der Rohdaten zeitlich unabhängig nachgeordnet sein. Hierzu werden gemessene Rohdaten typischerweise zunächst in ein elektrisches Signal gewandelt, digitalisiert und aufgezeichnet. Die eigentliche Auswertung erfolgt dann mittels Einlesen oder Abspielen in ein Auswertungsgerät. Die Asynchronität dieses Vorgangs hat in der Praxis einige Vorteile. So ist zum Beispiel eine Optimierung von Auswerteparametern besser möglich, da die verfügbare Zeit vor Ort zum Zeitpunkt einer Messung in der Regel begrenzt ist. Insbesondere lässt sich der Auswertungsvorgang mittels erneutem Einlesen der Daten auch mit verschiedenen Auswertungsparametern wiederholen, wogegen sich vor Ort zum Zeitpunkt der Datenakquisition einzelne Ereignisse in den Rohdaten naturgemäß nicht reproduzieren lassen. Häufig ist aber auch die direkte Auswertung vor Ort aufgrund der örtlichen Bedingungen (Messung am Südpol oder dergleichen) oder aufgrund der Zeitskalen (Jahre in der Ozeanographie) unmöglich.

[0018] Eine bevorzugte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass beim Bestimmen der gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion eine vorhandene gemittelte frequenzabhängige Übertragungsfunktion mit einer aktuell bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion gemittelt wird, wobei die aktuell bestimmte frequenzabhängige Übertragungsfunktion der zugeordneten frequenzabhängigen Gewichtung entsprechend in die Mittelung einbezogen wird. Im Rahmen der Bestimmung der gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für das lineare zeitinvariante System wird hierbei also eine aktuell bestimmte Übertragungsfunktion mit dem vorhandenen und zuvor bestimmten Mittelwert für die Übertragungsfunktion gemittelt.

[0019] Bei einer zweckmäßigen Ausgestaltung der Erfindung kann vorgesehen sein, dass der zumindest eine Teil der bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen jeweils einer frequenzabhängigen Schwellwertfunktion entsprechend gewichtet wird. Für die Analyse eines Eingangsspektrums oder die Berechnung einer Übertragungsfunktion wird hierbei in einer Ausgestaltung das Zeitsignal eines Eingangskanals blockweise in den Frequenzbereich transformiert. Soll das Eingangsspektrum direkt analysiert werden, werden diese Blöcke nach der Fourier-Transformation un-

mittelbar gemittelt. Bei Berechnung einer Übertragungsfunktion erfolgt keine Mittelung der Eingangsspektren.

[0020] Es wird in einer Ausgestaltung die Fourier-Transformation wie folgt definiert:

5

$$S(f_j) = F(s(t_i))$$

[0021] Hierbei steht $s(t_i)$ für das eintreffende, abgetastete Zeitsignal der Amplitude s zu Zeitpunkten t_i , F für die diskrete Fourier-Transformation über einen Zeitbereich $i = 1..N$ und $S(f_j)$ für das resultierende diskrete, komplexe Amplitudenspektrum mit Werten S für Frequenzen f_j .

10 **[0022]** Im hier relevanten Verfahren werden jedoch in beiden oben genannten Fällen die nunmehr frequenzabhängigen Daten einem logischen Filter unterworfen, der im einfachsten Fall eine frequenzabhängige Mindestamplitude, d.h. das Überschreiten eines Schwellwertes, erfordert. Amplitudenwerte einer Frequenz, die nicht diese Schwelle erreichen, werden also von der Mittelung oder Weiterverarbeitung ausgeschlossen. In der Praxis wird dies beispielsweise so realisiert, dass der Nutzer zunächst das Störspektrum am Eingangskanal misst und dann als Vergleichsgröße benutzt. Dabei wird typischerweise ein Signal-Rausch-Abstand vorgegeben, der somit die Signalamplitude frequenzabhängig definiert, die erreicht werden muss, damit die jeweilige Messung wiederum frequenzabhängig weiterverarbeitet wird.

15 **[0023]** Zur Weiterverarbeitung des Amplitudenwertes einer einzelnen Frequenz j muss in dem Ausführungsbeispiel also folgende Bedingung erfüllt sein:

20

$$|S(f_j)| > |G(f_j)|$$

wobei $G(f_j)$ die Schwellwertfunktion darstellt, die als Amplitude G für die Frequenz f_j definiert wird. Die Weiterverarbeitung umfasst insbesondere die Entfaltung von Referenz- und Messsignalen sowie die Mittelung der so gemessenen Übertragungsfunktionen.

25

[0024] Der Vergleich von S und G muss dabei nicht notwendiger Weise nur den Betrag einschließen, sondern kann auch auf Basis von Real- und Imaginärteil oder über eine andere mathematische Metrik definiert sein. Bei bekanntem oder angenommenem Störspektrum $N(f_j)$ wird G als Summe aus diesem Spektrum und einem ggf. frequenzabhängigen Signal-Rausch-Abstand $D(f_j)$ definiert, der mindestens eingehalten werden muss:

30

$$G(f_j) = N(f_j) + D(f_j)$$

[0025] Alternativ kann auch ein Dynamikbereich B definiert werden, der beispielsweise abhängig von der maximalen oder mittleren Signalamplitude über den gesamten oder einen Teilfrequenzbereich des jeweiligen Blockes den Messwert für eine Frequenz ausschließt, wenn dieser zu niedrig ist.

35

$$|S(f_j)| > \max \{|S(f_j)| \text{ für alle } j\} - B$$

40

[0026] Dies ist eine spezielle Realisierung von $G(f_j)$, das hier auch eine Funktion von S ist, also

45

$$G = G(f_j, S)$$

[0027] Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Schwellwertfilter prinzipiell so angelegt ist, dass er alle dauerhaft vorhandenen Komponenten aus dem Eingangssignal entfernt, die nicht durch das Anregungssignal hervorgerufen werden und auch im unangeregten Zustand des zu messenden Systems vorhanden sind.

50

[0028] Eine vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung sieht vor, dass der zumindest eine Teil der bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen jeweils einer frequenzabhängigen metrischen Abstandsfunktion entsprechend gewichtet wird, wobei die metrische Abstandsfunktion die frequenzabhängige Gewichtung in Abhängigkeit von einem metrischen Abstand zwischen der vorhandenen gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion und der aktuell bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion angibt. Für die Ermittlung der Übertragungsfunktion kommt in dieser Ausführung ein so genannter "Exkursionsfilter" zum Einsatz, der kurzzeitige, pegelstarke Störungen aus der Messung herausfiltert. Dieser Filter wird bereits nach der Berechnung der Übertragungsfunktion aus den Eingangssignalen angewendet. Es wird zunächst die Übertragungsfunktion als spektrale Funktion definiert, die sich aus

55

der Entfaltung zweier Eingangssignale ergibt. Sei S^Y das Hauptsignal und S^X das Referenzsignal, mit dem verglichen werden soll, dann gilt im Frequenzbereich für die Übertragungsfunktion H:

5

$$H(f_j) = S^Y(f_j) / S^X(f_j)$$

[0029] Im Detail betrachtet können an dieser Stelle verschiedene Verfahren eingesetzt werden, die verhindern, dass das Ergebnis durch zu kleine Divisoren divergiert. Derartige Verfahren sind als solche in verschiedenen Ausführungen bekannt (vgl. zum Beispiel B. Buttkus, "Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2000). Auch kann die Schwellwertanalyse, die oben beschrieben ist, eingesetzt werden, um zu kleine Beträge von $S^X(f_j)$ auszuschließen.

10

[0030] Die Ausführungsform "Exkursionsfilter" setzt in einer Ausgestaltung voraus, dass bereits Wissen über die Übertragungsfunktion existiert, sei dies aus Annahmen oder aus vorhergehenden Messungen. Es ist nun die Anwendung eines weiteren Filters vorgesehen, der insbesondere für die Mittelung über mehrere oben genannte Messungen der Übertragungsfunktion wichtig ist. Der Filter kann aus zwei Komponenten bestehen, von denen allerdings nur eine Anwendung finden muss. Einerseits wird ein komplexer Toleranzschlauch $T(f_j)$ definiert, innerhalb dessen sich annehmbare, d.h. als gültig anzusehende Werte befinden müssen, um der Annahme eines zeitunabhängigen Systems innerhalb einer zugelassenen Messunsicherheit zu genügen:

15

20

$$|H(f_j) - H_0(f_j)| < |T(f_j)|$$

wobei $H_0(f_j)$ den Vergleichswert darstellt, der vorgegeben oder aus Messungen gewonnen werden kann. Hierbei sei wiederum der absolute Betrag als beispielhafte Metrik verstanden, unter bestimmten Bedingungen ist zum Beispiel aber auch nur die Phasenabweichung relevant oder ein anderer Abstandsbegriff, der eine Metrik im mathematischen Sinne festlegt.

25

[0031] Als zweite Komponente kann eine kontinuierliche Gewichtsfunktion $W(f_j)$ verwendet werden, die insbesondere bei der laufenden Mittelwertbildung interessant ist. Hierbei geht der neue Messwert $H(f_j)$ nur in Abhängigkeit von seiner Abweichung vom Vergleichswert H_0 in den Mittelwert $H_M(f_j)$ bzw. $H_M^{Neu}(f_j)$ ein:

30

$$H_M^{Neu}(f_j) = c \cdot [H_M(f_j) + H(f_j) \cdot W(f_j)]$$

wobei c eine für unsere Zwecke unerhebliche Normierungskonstante für die Mittelwertbildung darstellt. Die Funktion $W(f_j)$ wird als Funktion von Messwert und Vergleichswert $W = W(H(f_j), H_0(f_j))$ verstanden, bei der es sich zum Beispiel um eine exponentielle Dämpfung handeln kann:

35

40

$$W(f_j) = W_0 \cdot \exp(-|H(f_j) - H_0(f_j)|)$$

wobei W_0 wiederum eine Normierungskonstante ist. Eine andere wichtige Realisierung ist eine Flat-Top Funktion, die innerhalb eines Toleranzschlauches $T(f_j)$ eine freie Veränderung zulässt und nur außerhalb eine abstandsabhängige Gewichtung, zum Beispiel als halber Cosinus der Breite b, definiert:

45

$$W(f_j) = W_0 \cdot \begin{cases} 1 & \text{wenn } |H(f_j) - H_0(f_j)| < |T(f_j)| \\ \text{Cos}((|H(f_j) - H_0(f_j)| - |T(f_j)|) \cdot \text{PI}/b)/2 + 0,5 & \text{wenn } |H(f_j) - H_0(f_j)| < |T(f_j)| + b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

50

[0032] Diese Realisierung entspräche zum Beispiel einem Tukey-Fenster, bezogen auf die Amplitudendifferenz zum Vergleichswert.

55

[0033] Insgesamt kann die Ausführungsform "Exkursionsfilter" so definiert werden, dass Messwerte, wahlweise frequenzabhängig, entfernt werden, die kurzzeitig auftreten und stark vom Erwartungswert abweichen. Dabei muss gleichzeitig gewahrt sein, dass bei Anwendung in einer Echtzeitmessung einem langsam veränderlichen System ggf. auch

gefolgt werden kann, dauerhafte Veränderungen in der Übertragungsfunktion also nicht ausgeschlossen werden, sondern mit einer wohl definierten Trägheit aufgenommen werden.

[0034] Bevorzugt sieht eine Fortbildung der Erfindung vor, dass der zumindest eine Teil der bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen jeweils einer frequenzabhängigen Korrelationsfunktion entsprechend gewichtet wird, wobei die Korrelationsfunktion die frequenzabhängige Gewichtung für eine frequenzabhängige Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von einer Korrelation zwischen dem frequenzabhängigen Referenzsignal und dem zugeordneten frequenzabhängigen Messsignal angibt, aus denen die frequenzabhängige Übertragungsfunktion bestimmt wird. Hierdurch ist ein Filter gebildet, der Messwerte auf Basis der Kohärenz evaluiert, weshalb auch von einem Kohärenzfilter gesprochen werden kann. In einer möglichen Ausführung wird das statistische Maß der Kohärenz eingesetzt, um festzustellen, wie groß die lineare Abhängigkeit zweier Eingangssignale voneinander ist. In einer möglichen Ausführungsform ist dies für die Ermittlung der linearen Übertragungsfunktion per Entfaltung eine Voraussetzung. Basierend auf der Kohärenz werden die Messwerte dann entweder verworfen oder weiterverwendet. Es können auch andere, der Kohärenz ähnliche Maße verwendet werden, um die lineare Abhängigkeit der beiden Eingangssignale zu bestimmen, zum Beispiel die Kreuzkorrelation. Die Kohärenz ist allgemein definiert als:

$$C_{XY}(f_j) = |\langle H(f_j) \rangle|^2 \cdot \langle |S^X(f_j)|^2 \rangle / \langle |S^Y(f_j)|^2 \rangle$$

[0035] Dabei definiert die Mittelwertfunktion $\langle \dots \rangle$ hier den Mittelwert über mehrere gemessene Blöcke von Rohdaten.

[0036] In einer Ausgestaltung des Verfahrens werden nun zunächst für jede Frequenz f_j die oben genannten rohen Mittelwerte $\langle \dots \rangle$ auf Basis von blockbasierten Rohdaten ermittelt. Hierbei kann es sich beispielsweise um eine definierte Anzahl von eingehenden Blöcken handeln, $\langle F \rangle = \sum F_k / N$, oder um eine laufende Mittelung mit zeitlicher Abklingkonstante τ , in der Form $\langle F \rangle \sim \sum F_k \exp(-k / \tau)$. Über die aus diesen Werten berechnete Kohärenz wird dann bestimmt, ob der jeweilige (rohe) Messwert $\langle H(f_j) \rangle$ in den Ergebnismittelwert $H_M(f_j)$ eingehen soll. Für diese Berechnung wird wieder eine Gewichtsfunktion, V , verwendet, die nun auf Basis der Kohärenz C_{XY} definiert ist:

$$H_M^{Neu}(f_j) = c \cdot [H_M(f_j) + \langle H(f_j) \rangle \cdot V(f_j)]$$

[0037] Beispielsweise wird ein fester Kohärenz-Schwellwert C_{Crit} benutzt, der frequenzabhängig festlegt, ob ein (roher) Messwert in den laufenden Ergebnismittelwert einfließt:

$$V(f_j) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } C_{XY}(f_j) > C_{Crit} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

[0038] Alternativ kann die Gewichtsfunktion auch kontinuierlich definiert sein und so Messwerte abhängig von und gewichtet mit der jeweiligen Größe ihrer Kohärenz weiterverarbeiten.

[0039] Dieser weitere Filter dient insbesondere dazu, kurzzeitige, nicht mit dem Anregungssignal korrelierte Störungen im Amplitudenbereich des Anregungssignals vom Messergebnis auszuschließen. Es ist in der Praxis häufig von Vorteil, den oben beschriebenen "Exkursionsfilter" vorzuschalten, da bei sehr großen Signalamplituden der aktuelle Messwert $H(f_j)$ die Kohärenz dominiert und damit die gesamte Messung stark verfälschen kann.

[0040] Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann vorgesehen sein, dass die gemittelte frequenzabhängige Übertragungsfunktion im Rahmen einer Echtzeitmessung für das lineare zeitinvariante System bestimmt wird. Bei dieser Ausführungsform wird die Übertragungsfunktion des untersuchten Systems einmal oder mehrfach in Echtzeit bestimmt.

[0041] Nachfolgend werden Aspekte der Erfindung weiter im Detail beschrieben.

[0042] Die Erfindung sieht einen oder mehrere Signalverarbeitungsschritte vor, die die Ergebnisqualität beim Bestimmen der Übertragungsfunktion deutlich erhöhen und / oder Messfehler signifikant reduzieren kann. Die erfindungsgemäßen Technologien können mit Hilfe von Verfahren und / oder Vorrichtungen umgesetzt werden. Beispielfhaft wird nachfolgend vor allem ergänzend die Anwendung in der Akustik und Audiotechnik dargestellt, auf welche die Anwendung der genannten Technologien aber nicht begrenzt ist.

[0043] Es wird dann angenommen, dass das Anregungssignal irregulär, d.h. zeitlich und spektral unterbrochen, sein kann und a priori nicht bekannt ist. Das Verfahren entfaltet seine Vorteile in besonderem Maße beim Messen von Systemen, die einem oder mehreren Störeinflüssen ausgesetzt sind. Die Verarbeitung kann als Filterung und Zeitfens-terung verstanden werden, die in Echtzeit oder als zeitlich von der Messung getrennter Schritt vorgenommen werden

kann. In der Praxis der Akustik und Audiotechnik ist wegen der Verwendung von Sprach- oder Musiksignalen in Live-Situationen insbesondere die Echtzeitfähigkeit maßgeblich. Es kommen in jedem Fall mindestens ein Messkanal, in der Regel jedoch zwei oder mehr Kanäle zum Einsatz.

[0044] Die Filterung erfolgt im hier dargestellten Ausführungsbeispiel auf mehreren Ebenen und ist bevorzugt in dieser Kombination gegen typische Störeffekte in den beschriebenen Situationen einzusetzen. In einer Ausgestaltung werden in einem ersten Schritt die Eingangssignale kanalweise in Bezug auf einen minimalen Signal-Rausch-Abstand vorgefiltert ("Schellwertfilter"); alternative oder zusätzliche Kriterien sind möglich. Anschließend erfolgt in einem zweiten Schritt die Behandlung von kurzzeitigen Schallereignissen hoher Amplitude mittels Ausschließen oder Gewichten auf Basis von zuvor ermittelten Messwerten durch Prüfung der Zeitinvarianz des gemessenen Systems ("Exkursionsfilter"). Als dritter Schritt wird in einer zweckmäßigen Ausgestaltung das statistische Maß der Kohärenz verwendet, um nur hochkorrelierte Anteile der Eingangssignale für die Berechnung einer Übertragungsfunktion zu verwenden ("Kohärenzfilter").

[0045] Alle diese Schritte erfolgen mit Frequenzauflösung. Mittelungs- und Glättungsprozesse können zusätzlich angewendet werden. Hervorgehoben sei, dass die beschriebenen Bearbeitungsschritte in einer Software-Implementierung typischerweise automatisch ablaufen und keine weitere Nutzerinteraktion nach der Vornahme der Startkonfiguration nötig ist.

[0046] Obwohl das Verfahren beispielhaft drei Schritte umfassend beschrieben wird, deren Kombination zu besonders vorteilhaften Ergebnissen führt, kann in anderen Ausführungsformen abweichend vorgesehen sein, ein oder sogar zwei der Schritte wegzulassen, weil entsprechende Störungen nicht auftreten und daher im Verfahren auch nicht berücksichtigt werden müssen. So kann zum Beispiel vorgesehen sein, dass nur der zweite und / oder der dritte Schritt angewendet werden.

[0047] Messungen linearer, zeitinvarianter Systeme werden in der Regel auf zwei verschiedenen Wegen durchgeführt. In einfacher Form wird ein Ausgangssignal aus dem System gemessen, dieses kann durch die Messapparatur selbst angeregt sein oder durch eine Sekundärquelle erzeugt werden. Hierbei ist insbesondere das entstehende Signalspektrum von Interesse. Typische Messungen werden mit Rosa oder Weißem Rauschen durchgeführt. In fortgeschrittener Form werden zwei Signalkanäle verwendet und auf dieser Basis eine Übertragungsfunktion ermittelt. Dabei dient ein Signal als Referenz und definiert so den Eingang in das zu messende System und das andere Signal wird als Ausgang des zu messenden Systems verstanden. Durch Vergleich, d.h. Entfaltung, der beiden Signalkanäle wird schließlich die Impulsantwort bzw. Übertragungsfunktion des Systems bestimmt.

[0048] Obwohl nachfolgend vereinfachend von einem Eingangssignal und einem Ausgangssignal ausgegangen wird, kann das Verfahren ganz allgemein eingesetzt werden, um die lineare Übertragungsfunktion eines Systems auf Basis einer bestimmten Zahl von Eingangskanälen und einer bestimmten Anzahl von Ausgangskanälen zu ermitteln. Die Kanäle können als Zeitreihen auf sehr kleinen, zum Beispiel Mikrosekundenbereich, bis sehr großen Skalen, beispielsweise Jahresbereich, aufgefasst werden. Bei mehreren Eingangs- oder Ausgangskanälen sind die später beschriebenen Verfahrensschritte und Größen demzufolge als mehrdimensional zu verstehen.

[0049] In der akustischen Praxis können sowohl das gemessene Signalspektrum als auch die Übertragungsfunktion im Frequenzbereich zur genauen akustischen Abstimmung ("*Tuning*") des Systems dienen. Darüber hinaus wird die Übertragungsfunktion im Zeit- oder Frequenzbereich zur zeitlichen Abstimmung ("*Alignment*") mehrerer Schallquellen, in der Regel Lautsprecher, verwendet. Für diese Anwendungen ist die schnelle Ermittlung eines Messergebnisses mit möglichst geringer Unsicherheit von großem Interesse. Dies gilt insbesondere bei der Verwendung von ohnehin in das zu messende System eingespielten Sprach- oder Musiksignalen. Deren starke zeitliche und spektrale Variation stellt im Vergleich zu typischen Anregungssignalen, wie Rosa Rauschen oder Gleitsinus, erhöhte Anforderungen an die Auswertung und führt ohne geeignete Bearbeitung in der Regel zu erheblich verlängerter Messdauer, erhöhtem Auswertungsaufwand und höherer Fehleranfälligkeit.

[0050] Die Übertragungsfunktion ist zum Beispiel auch in elektrischen Anwendungen wichtig. In diesem Fall werden Frequenzgänge oder frequenzabhängige komplexe Impedanzen gemessen, es kann sich um Leistungsverstärker, Lautsprecher oder einzelne elektronische Bauteile handeln. Auch hier können spektral und zeitlich irreguläre Signale zum Einsatz kommen, gerade wenn das zu messende System nicht von der Messapparatur selbst angeregt wird.

[0051] Ein anderes mögliches Anwendungsfeld für die vorgeschlagenen Technologien ist die Ozeanographie, bei der die Übertragungsfunktion als Antwortfunktion eines Binnenmeeres oder Ozeans auf Skalen von Monaten und Jahren zu verstehen ist. Sind die Voraussetzungen für ein lineares, zeitlich invariantes System gegeben, so lassen sich beispielsweise Zeitreihen für vertikale Temperaturschichtung und lokalen Salzgehalt als Funktion von Zeitreihen für Sonneneinstrahlung und Windintensitäten und -richtungen verstehen.

[0052] Weitere Anwendungsfelder sind zum Beispiel klimatologischer oder geophysikalischer Natur sein. Auch hier kann vorgesehen sein, auf Basis externer Anregungen die lineare Übertragungsfunktion des untersuchten Systems aus gemessenen Zeitreihen für verschiedene, das Systeme beschreibende Zustandsgrößen zu extrahieren.

[0053] Die Erfindung kombiniert mehrere Verfahrensaspekte, deren gemeinsame Verwendung in besonderem Maße zielführend ist, da hierdurch alle in der Praxis häufig auftretenden Störeffekte ausgeschlossen werden können. Hierbei handelt es sich vor allem um (i) Grundrauschen bzw. zufällige Störgeräusche in kontinuierlicher Form mit niedrigem

Pegel, (ii) kurzzeitige, amplitudenstarke Störungen und (iii) systematisch auftretende Störgeräusche mit einer dem Anregungssignal ähnlichen Pegelstärke, die aber nicht mit dem Anregungssignal korrelieren.

[0054] Die aufgrund dieser drei zentralen und prinzipiellen Ursachen in der Praxis immer auftretenden Fehler werden mittels der sich ergänzenden Teilverfahren in wesentlichem Maße kompensiert, wodurch die Messunsicherheit minimiert ist. Die Kombination der Teilschritte ermöglicht die sichere Verwendung des Messverfahrens in typischen praktischen Situationen.

[0055] Die Methode zur Bestimmung der Übertragungsfunktion durch die hier vorgeschlagene spektral selektive Akkumulation wird eingesetzt, um aus einem im Frequenzbereich stark inhomogenen und im Zeitbereich stark veränderlichen Referenzsignal, speziell in der Akustik und Audiotechnik Live-Sound, und einem im Frequenzbereich stark inhomogen und im Zeitbereich stark veränderlich gestörten Messsignal eine zeitunabhängige spektrale Übertragungsfunktion sowie deren frequenzabhängige Unsicherheit zu ermitteln.

[0056] Während des laufenden Messbetriebs wird ständig die vorhandene Version der Übertragungsfunktion mit der aktuell neu berechneten an jedem Frequenzpunkt verglichen. Insbesondere wird gefordert, dass ein gültiger neuer Messwert innerhalb der geschätzten Unsicherheit des vorhandenen Wertes liegen muss, und der vorhandene innerhalb der geschätzten Unsicherheit des neuen Messwerts. Je nach Ergebnis dieses Vergleichs wird entweder der neue Wert verworfen und der alte beibehalten, der alte Wert verworfen und der neue übernommen, oder der alte wird mit dem neuen kombiniert unter der Bedingung, dass der kombinierte Wert eine kleinere Unsicherheit hat als der alte und der neue. Dadurch führt das Verfahren durch zeitliche Akkumulation der Messergebnisse zwingend zu einer systematischen Verringerung der Unsicherheit der ermittelten Übertragungsfunktion.

[0057] Zur Schätzung der Unsicherheit eines Messwerts werden hauptsächlich drei verschiedene Verfahren benutzt. Erstens wird im "Schwellwertverfahren" die momentane Amplitude des Referenzsignals an jedem Frequenzpunkt mit einer vorher geschätzten oder gemessenen Rauschschwelle verglichen. Zweitens wird im "Exkursionsverfahren" die scheinbare zeitliche Änderung der Amplitude der Übertragungsfunktion an jedem Frequenzpunkt über der Zeit kontrolliert. Drittens wird im "Kohärenzverfahren" die zeitliche Korrelation der Änderung des Messsignals mit der Änderung des Referenzsignals an jedem Frequenzpunkt bestimmt. Die genannten Verfahren ergänzen sich, müssen aber nicht notwendiger Weise gemeinsam Anwendung finden.

Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele der Erfindung

[0058] Die Erfindung wird im Folgenden anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf Figuren einer Zeichnung näher erläutert. Hierbei zeigen:

- Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein lineares zeitinvariantes System,
- Fig. 2 eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion in Verbindung mit einer akustischen Echtzeitmessung,
- Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion in Verbindung mit einer elektrischen Prüfmessung
- Fig. 4 eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion in Verbindung mit einer ozeanografischen Messung,
- Fig. 5 eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion in Verbindung mit einer akustischen Tomografie,
- Fig. 6 eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion in Verbindung mit einer geologischen Messung und
- Fig. 7 eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion in Verbindung mit einer klimatologischen Messung.

[0059] Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Anordnung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein gestörtes lineares zeitinvariantes System.

[0060] Der schematischen Darstellung in Fig. 1 entsprechend werden für ein lineares zeitinvariantes System 1 mit Hilfe einer Messeinrichtung 2 Messsignale erfasst und auf eine Auswerteeinrichtung 3 gegeben. In der Auswerteeinrichtung 3 werden die über einen Eingang 4 empfangenen Messsignale jeweils zugehörigen Referenzsignalen zugeordnet, die in der Auswerteeinrichtung 3 für eine Anregungsquelle 5 bereitgestellt werden. In der Auswerteeinrichtung 3 erfolgt die Bestimmung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für das lineare zeitinvariante System 1 mittels Auswerten der empfangenen Mess- und Referenzsignale. Das Ergebnis wird an einem Ausgang 6 bereitgestellt.

[0061] Hierbei findet eine Mittelung für die bestimmten Übertragungsfunktionen statt, derart, dass während einer Messung für das lineare zeitinvariante System 1 eine aktuell bestimmte Übertragungsfunktion mit einem vorhandenen Mittelwert für die Übertragungsfunktionen gemittelt wird. Bei diesem Mittelungsprozess geht die aktuell bestimmte Über-

tragungsfunktion mit einer frequenzabhängigen Gewichtung ein. Zur Umsetzung der frequenzabhängigen Gewichtung verfügt die Auswerteeinrichtung 3 in der dargestellten Ausführungsform über einen Schwellwertfilter 7, einen Exkursionsfilter 8 sowie einen Kohärenzfilter 9. Gemäß der Darstellung in Fig. 1 können in Verbindung mit einer frequenzabhängigen Übertragungsfunktion ein, zwei oder alle drei Filter zum Einsatz kommen.

[0062] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele für die Filter im Detail beschrieben.

[0063] Zunächst wird auf ein sogenanntes Schwellwertverfahren eingegangen.

[0064] Für die Analyse eines Eingangsspektrums oder die Berechnung einer Übertragungsfunktion wird hierbei in einer Ausgestaltung das Zeitsignal eines Eingangskanals blockweise in den Frequenzbereich transformiert. Soll das Eingangsspektrum direkt analysiert werden, werden diese Blöcke nach der Fourier-Transformation unmittelbar gemittelt. Bei Berechnung einer Übertragungsfunktion erfolgt keine Mittelung der Eingangsspektren.

[0065] Es wird die Fourier-Transformation wie folgt definiert:

$$S(f_j) = F(s(t_i))$$

[0066] Hierbei steht $s(t_i)$ für das eintreffende, abgetastete Zeitsignal der Amplitude s zu Zeitpunkten t_i , F für die diskrete Fourier-Transformation über einen Zeitbereich $i = 1..N$ und $S(f_j)$ für das resultierende diskrete, komplexe Amplitudenspektrum mit Werten S für Frequenzen f_j .

[0067] Im hier relevanten Verfahren werden jedoch in beiden oben genannten Fällen die nunmehr frequenzabhängigen Daten einem logischen Filter unterworfen, der im einfachsten Fall eine frequenzabhängige Mindestamplitude, d.h. das Überschreiten eines Schwellwertes, erfordert. Amplitudenwerte einer Frequenz, die nicht diese Schwelle erreichen, werden also von der Mittelung oder Weiterverarbeitung ausgeschlossen. In der Praxis wird dies beispielsweise so realisiert, dass der Nutzer zunächst das Störspektrum am Eingangskanal misst und dann als Vergleichsgröße benutzt. Dabei wird typischerweise ein Signal-Rausch-Abstand vorgegeben, der somit die Signalamplitude frequenzabhängig definiert, die erreicht werden muss, damit die jeweilige Messung wiederum frequenzabhängig weiterverarbeitet wird.

[0068] Zur Weiterverarbeitung des Amplitudenwertes einer einzelnen Frequenz j muss also folgende Bedingung erfüllt sein:

$$|S(f_j)| > |G(f_j)|$$

wobei $G(f_j)$ die Schwellwertfunktion darstellt, die als Amplitude G für die Frequenz f_j definiert wird. Der Vergleich muss dabei nicht notwendiger Weise nur den Betrag einschließen, sondern kann auch auf Basis von Real- und Imaginärteil oder über eine andere mathematische Metrik definiert sein. Bei bekanntem oder angenommenem Störspektrum $N(f_j)$ wird man G als Summe aus diesem Spektrum und einem ggf. frequenzabhängigen Signal-Rausch-Abstand $D(f_j)$ definieren, der mindestens eingehalten werden muss:

$$G(f_j) = N(f_j) + D(f_j)$$

[0069] Alternativ kann auch ein Dynamikbereich B definiert werden, der beispielsweise abhängig von der maximalen oder mittleren Signalamplitude über den gesamten oder einen Teilfrequenzbereich des jeweiligen Blockes den Messwert für eine Frequenz ausschließt, wenn dieser zu niedrig ist.

$$|S(f_j)| > \max \{|S(f_j)| \text{ für alle } j\} - B$$

[0070] Dies ist eine spezielle Realisierung von $G(f_j)$, das hier auch eine Funktion von S ist, also

$$G = G(f_j, S)$$

[0071] Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Schwellwertfilter prinzipiell so angelegt ist, dass er alle dauerhaft vorhandenen Komponenten aus dem Eingangssignal entfernt, die nicht durch das Anregungssignal hervorgerufen werden und auch im unangeregten Zustand des zu messenden Systems vorhanden sind.

[0072] Nachfolgend wird nun auf ein sogenanntes Exkursionsverfahren eingegangen.

[0073] Für die Ermittlung der Übertragungsfunktion kommt in dieser Ausführung ein so genannter "Exkursionsfilter"

zum Einsatz, der kurzzeitige, pegelstarke Störungen aus der Messung herausfiltert. Dieser Filter wird bereits nach der Berechnung der Übertragungsfunktion aus den Eingangssignalen angewendet.

[0074] Es wird zunächst die Übertragungsfunktion als spektrale Funktion definiert, die sich aus der Entfaltung zweier Eingangssignale ergibt. Sei S^Y das Hauptsignal und S^X das Referenzsignal, mit dem verglichen werden soll, dann gilt im Frequenzbereich für die Übertragungsfunktion H:

$$H(f_j) = S^Y(f_j) / S^X(f_j)$$

[0075] Im Detail betrachtet werden an dieser Stelle noch verschiedene Verfahren eingesetzt, die verhindern, dass das Ergebnis durch zu kleine Divisoren divergiert. Diese sind nicht Bestandteil der Erfindung und werden als allgemein bekannt vorausgesetzt. Allerdings kann die Schwellwertanalyse, die im vorigen Abschnitt beschrieben ist, ebenfalls eingesetzt werden, um zu kleine Beträge von $S^X(f_j)$ auszuschließen.

[0076] Der Exkursionsfilter setzt voraus, dass bereits Wissen über die Übertragungsfunktion existiert, sei dies aus Annahmen oder aus vorhergehenden Messungen. Die Erfindung beinhaltet nun die Anwendung eines weiteren Filters, der insbesondere für die Mittelung über mehrere oben genannte Messungen der Übertragungsfunktion wichtig ist.

[0077] Er kann aus zwei Komponenten bestehen, von denen allerdings nur eine Anwendung finden muss. Einerseits definieren wir einen komplexen Toleranzschlauch $T(f_j)$ innerhalb dessen sich annehmbare, d.h. als gültig anzusehende Werte befinden müssen, um der Annahme eines zeitunabhängigen Systems innerhalb einer zugelassenen Messunsicherheit zu genügen:

$$|H(f_j) - H_0(f_j)| < |T(f_j)|$$

wobei $H_0(f_j)$ den Vergleichswert darstellt, der vorgegeben oder aus Messungen gewonnen werden kann. Hierbei sei wiederum der absolute Betrag als beispielhafte Metrik verstanden, unter bestimmten Bedingungen ist zum Beispiel aber auch nur die Phasenabweichung relevant oder ein anderer Abstandsbegriff, der eine Metrik im mathematischen Sinne festlegt.

[0078] Als zweite Komponente kann eine kontinuierliche Gewichtsfunktion $W(f_j)$ verwendet werden, die insbesondere bei der laufenden Mittelwertbildung interessant ist. Hierbei geht der neue Messwert $H(f_j)$ nur in Abhängigkeit von seiner Abweichung vom Vergleichswert H_0 in den Mittelwert $H_M(f_j)$ bzw. $H_M^{Neu}(f_j)$ ein:

$$H_M^{Neu}(f_j) = c \cdot [H_M(f_j) + H(f_j) \cdot W(f_j)]$$

wobei c eine für unsere Zwecke unerhebliche Normierungskonstante für die Mittelwertbildung darstellt. Die Funktion $W(f_j)$ wird als Funktion von Messwert und Vergleichswert $W = W(H(f_j), H_0(f_j))$ verstanden, bei der es sich zum Beispiel um eine exponentielle Dämpfung handeln kann:

$$W(f_j) = W_0 \cdot \exp(-|H(f_j) - H_0(f_j)|)$$

wobei W_0 wiederum eine Normierungskonstante ist. Eine andere wichtige Realisierung ist eine Flat-Top Funktion, die innerhalb eines Toleranzschlauches $T(f_j)$ eine freie Veränderung zulässt und nur außerhalb eine abstandsabhängige Gewichtung, zum Beispiel als halber Cosinus der Breite b, definiert:

$$W(f_j) = W_0 \cdot$$

{ 1	wenn $ H(f_j) - H_0(f_j) < T(f_j) $
{ $\text{Cos}((H(f_j) - H_0(f_j) - T(f_j)) \cdot \text{PI}/b)/2 + 0,5$	wenn $ H(f_j) - H_0(f_j) < T(f_j) + b$
{ 0	sonst

[0079] Diese Realisierung entspräche zum Beispiel einem Tukey-Fenster, bezogen auf die Amplitudendifferenz zum Vergleichswert.

[0080] Insgesamt ist der Exkursionsfilter so definiert, dass er Messwerte, ggf. frequenzabhängig, entfernt, die kurzzeitig

auftreten und stark vom Erwartungswert abweichen. Dabei muss gleichzeitig gewahrt sein, dass bei Anwendung in einer Echtzeitmessung einem langsam veränderlichen System ggf. auch gefolgt werden kann, dauerhafte Veränderungen in der Übertragungsfunktion also nicht ausgeschlossen werden, sondern mit einer wohldefinierten Trägheit aufgenommen werden.

5 **[0081]** Nachfolgend wird weiter auf ein sogenanntes Kohärenzverfahren eingegangen.

[0082] Es ist ein weiterer Filter gebildet, der beim Bestimmen der gemittelten Übertragungsfunktion Messsignale auf Basis der Kohärenz evaluiert. Hierbei wird das statistische Maß der Kohärenz eingesetzt, um festzustellen, wie groß die lineare Abhängigkeit zweier Eingangssignale voneinander ist. Dies ist für die Ermittlung der linearen Übertragungsfunktion per Entfaltung eine entscheidende Voraussetzung. Basierend auf der Kohärenz werden die Messwerte dann
10 entweder verworfen oder weiterverwendet. Naturgemäß können auch andere, der Kohärenz ähnliche Maße verwendet werden, um die lineare Abhängigkeit der beiden Eingangssignale zu bestimmen, zum Beispiel die Kreuzkorrelation.

[0083] Die Kohärenz ist allgemein definiert als:

$$15 \quad C_{XY}(f_j) = |\langle H(f_j) \rangle|^2 \cdot \langle |S^X(f_j)|^2 \rangle / \langle |S^Y(f_j)|^2 \rangle$$

[0084] Dabei definiert die Mittelwertfunktion $\langle \dots \rangle$ hier den Mittelwert über mehrere gemessene Blöcke von Rohdaten.

[0085] Im praktischen Verfahren werden nun zunächst für jede Frequenz f_j die o.g. rohen Mittelwerte $\langle \dots \rangle$ auf Basis der blockbasierten Rohdaten ermittelt. Dabei kann es sich beispielsweise um eine definierte Anzahl von eingehenden
20 Blöcken handeln, $\langle F \rangle = \sum F_k / N$, oder um eine laufende Mittelung mit zeitlicher Abklingkonstante τ , in der Form $\langle F \rangle \sim \sum F_k \exp(-k / \tau)$. Über die aus diesen Werten berechnete Kohärenz wird dann bestimmt, ob der jeweilige (rohe) Messwert $\langle H(f_j) \rangle$ in den Ergebnismittelwert $H_M(f_j)$ eingehen soll. Für diese Berechnung wird wieder eine Gewichtsfunktion, V , verwendet, die nun auf Basis der Kohärenz C_{XY} definiert ist:

$$25 \quad H_M^{\text{Neu}}(f_j) = c \cdot [H_M(f_j) + \langle H(f_j) \rangle \cdot V(f_j)]$$

[0086] Beispielsweise wird ein fester Kohärenz-Schwellwert C_{Crit} benutzt, der frequenzabhängig festlegt, ob ein (roher) Messwert in den laufenden Ergebnismittelwert einfließt:

$$30 \quad V(f_j) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } C_{XY}(f_j) > C_{\text{Crit}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

[0087] Alternativ kann die Gewichtsfunktion auch kontinuierlich definiert sein und so Messwerte abhängig von und gewichtet mit der jeweiligen Größe ihrer Kohärenz weiterverarbeiten.

[0088] Dieser dritte Filter stellt vor allem sicher, dass kurzzeitige, nicht mit dem Anregungssignal korrelierte Störungen im Amplitudenbereich des Anregungssignals vom Messergebnis ausgeschlossen werden. Es ist in der Praxis zumeist
40 notwendig, den oben beschriebenen Exkursionsfilter vorzuschalten, da bei sehr großen Signalamplituden der aktuelle Messwert $H(f_j)$ die Kohärenz dominiert und damit die gesamte Messung stark verfälschen kann.

[0089] In den Fig. 2 bis 7 sind schematische Darstellungen gezeigt für Anordnungen zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein lineares zeitinvariantes System in Verbindung mit verschiedenen Anwendungsbeispielen. So zeigt Fig. 2 dieses für eine akustische Echtzeitmessung. Fig. 3 bezieht sich auf eine elek-
45 trische Prüfmessung. Die Fig. 4 und 5 betreffen eine ozeanografische Messung sowie eine akustische Tomografie. Schließlich betreffen die Fig. 6 und 7 eine geologische Messung sowie eine klimatologische Messung.

[0090] Für gleiche Merkmale werden in den Fig. 2 bis 7 dieselben Bezugszeichen wie in Fig. 1 verwendet.

[0091] Zunächst wird eine Nutzung bei einem messtechnischen Verfahren erläutert, bei dem aus physikalischen Eingangsgrößen physikalische Messwerte abgeleitet werden. Insbesondere wird ein lineares zeitinvariantes System (LTI-System) angenommen, dessen Antwortfunktion sich aus den physikalischen Ausgangsgrößen einer Anregung mit ebenfalls bekannten physikalischen Eingangsgrößen bestimmen lässt. In Praxis sind solche Messungen immer mit Störungen versehen: Hintergrundgeräusch, kurze, amplitudenstarke Störungen und nichtkorrelierte, zur Anregung in-
50 kohärente Störsignale. Bei der Bestimmung der Übertragungsfunktion erfolgt eine Entfernung dieser Effekte, die die gemessenen Zeitreihen der betrachteten Größen überlagern, durch Vorschaltung (Filtern) vor die eigentliche Auswertung durch Entfaltung, unter der Voraussetzung, dass die Störungen nicht vom Anregungssignal abhängen und sich wesentlich schneller ändern als das lineare zeitinvariante System selbst.

[0092] Die Bestimmung der gemittelten Übertragungsfunktion kann in Echtzeit ausgeführt werden. Hierbei werden

die Eingänge der Auswerteinrichtung ausgewertet während parallel weitere Daten am Eingang aufgenommen werden.

[0093] Auch eine Nutzung in der Nachbearbeitung kann vorgesehen sein. Hierbei liegen Eingänge analog oder digital als Daten vor und werden in das Messsystem gespielt. Die Filterung kann der Aufnahme der Rohdaten zeitlich unabhängig nachgeordnet sein. Hierzu werden gemessene Rohdaten typischerweise zunächst in ein elektrisches Signal gewandelt, digitalisiert und aufgezeichnet. Die eigentliche Auswertung erfolgt dann mittels Einlesen oder Abspielen in ein Auswertungsgerät. Die Asynchronität dieses Vorgangs hat in der Praxis einige Vorteile. So ist zum Beispiel eine Optimierung von Auswerteparametern besser möglich, da die verfügbare Zeit vor Ort zum Zeitpunkt einer Messung in der Regel begrenzt ist. Insbesondere lässt sich der Auswertungsvorgang mittels erneutem Einlesen der Daten auch mit verschiedenen Auswertungsparametern wiederholen, wogegen sich vor Ort zum Zeitpunkt der Datenakquisition einzelne Ereignisse in den Rohdaten naturgemäß nicht reproduzieren lassen. Häufig ist aber auch die direkte Auswertung vor Ort aufgrund der örtlichen Bedingungen (Messung am Südpol oder dergleichen) oder aufgrund der Zeitskalen (Jahre in der Ozeanographie) unmöglich.

[0094] Das Verfahren zum Bestimmen der gemittelten Übertragungsfunktion in einer der vorangehend beschriebenen Ausgestaltungen kann beispielsweise in Verbindung mit der akustischen Echtzeitmessung im besetzten Stadion genutzt werden (vgl. Fig. 2).

[0095] Ausgabesignal ist ein beliebiges für die zu bestimmende Übertragungsfunktion hinreichend breitbandiges Audiosignal. Es wird vom Mischpult über die Verstärker und über die Lautsprecher im Stadion ausgegeben. Das Referenzsignal wird elektrisch vom Mischpult bezogen und über A/D-Wandler auf den Rechner gespielt. Das Messsignal wird elektrisch vom Mikrofon im Stadion bezogen, nimmt das akustische Signal am Empfangspunkt auf. Die Messkette schließt somit Lautsprecher, Übertragungsweg im Stadion und Mikrofon ein. Die Eingangssignale sind jeweils elektrisch (U in V), können aber auch einzeln oder zusammen akustisch verstanden werden (p in Pa), wenn Mikrofon bzw. Lautsprecher kalibriert sind (Pa/V bzw. V/Pa).

[0096] Verwandte Ausführungsbeispiele betreffen die Messung eines Lautsprechers im Labor zum Zwecke der Lautsprecherentwicklung, raumakustische Messungen, zum Beispiel in Theatern, Kirchen, Bahnhöfen, oder automatisierte Prüfmessungen von Sprachalarmierungsanlagen.

[0097] Es kann auch zunächst die Aufzeichnung der Signale und das anschließend getrennte Auswerten vorgesehen sein.

[0098] Das Verfahren zum Bestimmen der gemittelten Übertragungsfunktion in einer der vorangehend beschriebenen Ausgestaltungen kann weiterhin in Verbindung mit einer elektrischen Prüfmessung genutzt werden (vgl. Fig. 3), zum Beispiel bei der Linienüberwachung elektroakustischer und elektrischer Anlagen.

[0099] Ausgabesignal ist ein beliebiges für die zu bestimmende Übertragungsfunktion hinreichend breitbandiges Abspielsignal. Es wird von der Zentraleinheit über die Verstärker und über die Lautsprecher im Stadion ausgegeben. Das Referenzsignal wird elektrisch von der Zentraleinheit bezogen und über A/D-Wandler auf den Rechner gespielt. Das Messsignal für das lineare zeitinvariante System wird elektrisch vom Ausgang der elektrischen Wiedergabekette bezogen, typischerweise abgenommen hinter dem Verstärker und vor dem Lautsprecher. Die Messkette schließt somit den kompletten elektrischen Übertragungsweg ausgabeseitig ein. Die Messgrößen der Eingänge sind jeweils elektrisch (U in V).

[0100] Verwandte Ausführungsbeispiele betreffen eine Prüfmessung oder Tuning eines DSP Controllers oder die Impedanzmessung der elektrischen Wiedergabekette.

[0101] Es kann auch wieder zunächst die Aufzeichnung der Signale und das anschließend getrennte Auswerten vorgesehen sein.

[0102] Das Verfahren zum Bestimmen der gemittelten Übertragungsfunktion in einer der vorangehend beschriebenen Ausgestaltungen kann beispielsweise auch in Verbindung mit der Ozeanographie genutzt werden (vgl. Fig. 4), zum Beispiel bei der Ermittlung räumlicher und zeitlicher Antwortfunktionen, wie Wasserfüllstand der Ostsee als Antwortfunktion der Windrichtung und -stärke, was nachfolgend erläutert wird.

[0103] Referenzsignal sind die gemessenen Windstärkekomponenten Nord und Ost im Raum der Dänischen Straßen (Sund und Belte), zum Beispiel Kap Arkona, Messstation des DWD (Deutscher Wetterdienst). Messsignal ist der Wasserfüllstandspegel vom SMHI bei Landsort, Schweden. Die Signale werden aus mechanischen in elektrische Größen gewandelt und stündlich aufgezeichnet, später prozessiert. Ergebnis ist die Abhängigkeit des Landsortpegels als Antwortfunktion der Ostsee auf die Nord- und die Ostkomponente des Windvektors in den Dänischen Straßen. Typische Länge der Antwortfunktion ist 10 Tage.

[0104] Praktisch relevant sind zum Beispiel Abschätzungen der Effekte von Bauvorhaben, wie der Fehmarnbeltbrücke.

[0105] Die Messkette beinhaltet referenzseitig den mechanischen Signalaufnehmer für Windrichtung und -geschwindigkeit, die in ein elektrisches Signal gewandelt, digitalisiert und aufgezeichnet werden. In ähnlicher Weise wird die Messung des Wasserfüllstands durchgeführt und aufgezeichnet.

[0106] Verwandte Ausführungsbeispiele betreffen die Messung anderer ozeanographischer Größen oder Abhängigkeiten wie Druck, Temperatur, Salzgehalt, Strömungsgeschwindigkeit.

[0107] Das Verfahren zum Bestimmen der gemittelten Übertragungsfunktion in einer der vorangehend beschriebenen

Ausgestaltungen kann auch in Verbindung mit der akustische Tomografie genutzt werden (vgl. Fig. 5), d.h. der Messung der Temperaturverteilung in Ozeanen mittels niederfrequenter akustischer Signale.

[0108] Referenzsignal ist hier in einer Ausgestaltung ein über einen Unterwasserlautsprecher eingespieltes Anregungssignal. Messsignal ist die durch ein Unterwassermessmikrofon aufgenommene Antwort des Ozeans auf die Anregung. Bei bekannter Bathymetrie, d.h. bekannten Reflexionspfaden, kann aus der Laufzeit der einzelnen Reflexionen auf die räumliche Temperaturverteilung geschlossen werden, da die Schallgeschwindigkeit maßgeblich von der Temperatur entlang des Ausbreitungsweges abhängt. Eingänge der Auswerteinrichtung sind jeweils elektrisch (U in V), können aber auch einzeln oder zusammen akustisch verstanden werden (p in Pa), wenn Mikrofon bzw. Lautsprecher kalibriert sind (Pa/V bzw. V/Pa). Die Auswertung kann in Echtzeit oder anschließend separat durchgeführt werden.

[0109] Das Verfahren zum Bestimmen der gemittelten Übertragungsfunktion in einer der vorangehend beschriebenen Ausgestaltungen kann in Verbindung mit der Geologie genutzt werden (vgl. Fig. 6), d.h. der Bestimmung der Lage, der Dicke, des Aufbaus und der Abmaße von Schalen/Schichten im Erdinneren.

[0110] Referenzsignal ist ein akustisches, lokal aufgenommenes Anregungssignal, häufig ausgelöst zum Beispiel durch Sprengungen, unterirdische Atomexplosionen oder Erdbeben. Messsignal ist ein akustisch aufgenommenes Signal an weit entfernten Empfangsorten. Aus den Antwortfunktionen verschiedener Messorte ergibt sich eine dreidimensionale Antwortfunktion auf die punktuelle Anregung. Aus dieser lassen sich Rückschlüsse auf den Aufbau des Erdinneren ziehen. Eingänge sind jeweils elektrisch (U in V), können aber auch einzeln oder zusammen akustisch (p in Pa) bzw. mechanisch (F in N) verstanden werden, je nach Kalibrierung der Signalaufnehmer.

[0111] Ein weiteres Ausführungsbeispiel betrifft die Klimatologie, zum Beispiel die Messung der Auswirkung von Veränderungen der Strahlungsintensität der Sonne auf klimatologische Größen wie den Niederschlag (vgl. Fig. 7).

[0112] Referenzsignal ist hier die gemessene Modulation der Strahlungsintensität der Sonne, bevorzugt durch einen Satelliten. Diese wird typischerweise maßgeblich durch den Sonnenfleckenzyklus beeinflusst. Messsignal ist die Niederschlagsreihe für St. Helena im Südatlantik, aufgenommen in mm im Monatsmittel. Ergebnis ist die Abhängigkeit von Niederschlägen als Antwortfunktion auf die Variation der Sonneneinstrahlung, bzw. die Signifikanz der Sonnenflecken. Eingänge sind nach Wandlung der Intensität bzw. Niederschlagsmenge jeweils elektrisch (U in V) vorhanden und werden digital aufgezeichnet. Die Auswertung wird typischerweise anschließend getrennt von der eigentlichen Messung ausgeführt.

[0113] Verwandte Ausführungsbeispiele betreffen die Messung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre auf Hawaii und der Lufttemperatur an verschiedenen Orten zur Ermittlung von Korrelationen bzw. Antwortfunktionen sowie die Messung von Wassertemperaturen vor Peru und Lufttemperaturen in Kapstadt, Südafrika, zur Charakterisierung der atmosphärischen Telekonnektion als Antwortfunktion auf das El-Nino-Phänomen.

[0114] Die in der vorstehenden Beschreibung, den Ansprüchen und der Zeichnung offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausführungsformen von Bedeutung sein.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein gestörtes lineares zeitinvariantes System mittels einer Auswertevorrichtung (3), wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- Bereitstellen von frequenzabhängigen Referenzsignalen an einem Eingang der Auswertevorrichtung (3), wobei die frequenzabhängigen Referenzsignale abgeleitet sind von auf ein lineares zeitinvariantes System gegebenen Anregungssignalen,
- Bereitstellen von frequenzabhängigen Messsignalen am Eingang der Auswertevorrichtung (3), wobei die frequenzabhängigen Messsignale für das lineare zeitinvariante System auf eine Anregung des linearen zeitinvarianten Systems mit den Anregungssignalen bestimmt werden und den frequenzabhängigen Referenzsignalen zugeordnet sind, und
- Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für das lineare zeitinvariante System, indem unter Verwendung einer Signalentfaltung einander zugeordneter Mess- und Referenzsignale aus den frequenzabhängigen Mess- und Referenzsignalen frequenzabhängige Übertragungsfunktionen blockweise bestimmt werden, derart, dass aus einem Block von einander zugeordneten Mess- und Referenzsignalen jeweils eine Übertragungsfunktion bestimmt wird, und die frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen gemittelt werden,

wobei beim Bestimmen der gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion zumindest ein Teil der bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen einer jeweils zugeordneten frequenzabhängigen Gewichtung entsprechend in die Mittelung eingeht.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** beim Bestimmen der gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion eine vorhandene gemittelte frequenzabhängige Übertragungsfunktion mit einer aktuell bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion gemittelt wird, wobei die aktuell bestimmte frequenzabhängige Übertragungsfunktion der zugeordneten frequenzabhängigen Gewichtung entsprechend in die Mittelung einbezogen wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zumindest eine Teil der bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen jeweils einer frequenzabhängigen Schwellwertfunktion entsprechend gewichtet wird.
4. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, soweit auf Anspruch 2 rückbezogen, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zumindest eine Teil der mehreren bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen jeweils einer frequenzabhängigen metrischen Abstandsfunktion entsprechend gewichtet wird, wobei die metrische Abstandsfunktion die frequenzabhängige Gewichtung in Abhängigkeit von einem metrischen Abstand zwischen der vorhandenen gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion und der aktuell bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion angibt.
5. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zumindest eine Teil der bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen jeweils einer frequenzabhängigen Korrelationsfunktion entsprechend gewichtet wird, wobei die Korrelationsfunktion die frequenzabhängige Gewichtung für eine frequenzabhängige Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von einer Korrelation zwischen dem frequenzabhängigen Referenzsignal und dem zugeordneten frequenzabhängigen Messsignal angibt, aus denen die frequenzabhängige Übertragungsfunktion bestimmt wird.
6. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die gemittelte frequenzabhängige Übertragungsfunktion im Rahmen einer Echtzeitmessung für das lineare zeitinvariante System bestimmt wird.
7. Auswertevorrichtung zum Bestimmen einer gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion für ein gestörtes lineares zeitinvariantes System, mit:
- mehreren Eingangskanälen, die konfiguriert sind, frequenzabhängige Referenzsignale, die abgeleitet sind von auf ein lineares zeitinvariantes System gegebenen Anregungssignale, und frequenzabhängige Messsignale zu empfangen, die für das lineare zeitinvariante System auf eine Anregung des linearen zeitinvarianten Systems mit den Anregungssignalen bestimmt werden und den frequenzabhängigen Referenzsignalen zugeordnet sind,
 - einer Auswerteeinheit, die an die mehreren Eingangskanäle gekoppelt und konfiguriert ist, eine gemittelte frequenzabhängige Übertragungsfunktion für das lineare zeitinvariante System zu bestimmen, indem unter Verwendung einer Signalentfaltung einander zugeordneter Mess- und Referenzsignale aus den frequenzabhängigen Mess- und Referenzsignalen frequenzabhängige Übertragungsfunktionen blockweise bestimmt werden, derart, dass aus einem Block von einander zugeordneten Mess- und Referenzsignalen jeweils eine Übertragungsfunktion bestimmt wird, und die frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen gemittelt werden, wobei beim Bestimmen der gemittelten frequenzabhängigen Übertragungsfunktion zumindest ein Teil der bestimmten frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen einer jeweils zugeordneten frequenzabhängigen Gewichtung entsprechend in die Mittelung eingeht.
8. Computerprogramm-Produkt mit Programmcode, welcher wahlweise auf einem computerlesbaren Speichermedium gespeichert ist und geeignet ist, beim Ablauf auf einer Rechenvorrichtung ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1-6 auszuführen.

Claims

1. A method for determining an averaged frequency-dependent transfer function for a perturbed linear time-invariant system by means of an evaluation device (3), wherein the method comprises:
- providing frequency-dependent reference signals at an input of the evaluation device (3), wherein the frequency-dependent reference signals are derived from excitation signals applied to a linear time-invariant system,
 - providing frequency-dependent measuring signals at the input of the evaluation device (3), wherein the fre-

quency-dependent measuring signals are determined for an excitation of the linear time-invariant system with the excitation signals and are associated with the frequency-dependent reference signals, and
- determining an averaged frequency-dependent transfer function for the linear time-invariant system, by using signal deconvolution of associated measuring signals and reference signals from the frequency-dependent measuring signals and reference signals, wherein frequency-dependent transfer functions are block-wise determined such that from each block of associated measuring signals and reference signals a respective transfer function is determined and the frequency-dependent transfer functions are averaged,

wherein when determining the averaged transfer function at least a part of the determined frequency-dependent transfer functions is included in the averaging corresponding to a respectively associated frequency-dependent weighting.

2. The method according to claim 1, **characterised in that** when determining the averaged frequency-dependent transfer function an existing averaged frequency-dependent transfer function is averaged with a currently determined frequency-dependent transfer function, wherein the currently determined frequency-dependent transfer function is included in the averaging corresponding to the associated frequency-dependent weighting.
3. The method according to claim 1 or 2, **characterised in that** the at least one part of the determined frequency-dependent transfer functions is weighted, respectively, corresponding to a frequency-dependent threshold value function.
4. The method according to at least one of the preceding claims, insofar as related back to claim 2, **characterised in that** the at least a part of the plurality of determined frequency-dependent transfer functions is weighted, corresponding to a respective frequency-dependent distance function, wherein the metric distance function indicates the frequency-dependent weighting in dependence of a metric distance between the existing averaged frequency-dependent transfer function and the currently determined frequency-dependent transfer function.
5. The method according to at least one of the preceding claims, **characterised in that** the at least a part of the determined frequency-dependent transfer functions is weighted corresponding to a respective frequency-dependent correlation function, wherein the correlation function indicates the frequency-dependent weighting for a frequency-dependent transfer function in dependence of a correlation between the frequency-dependent reference signal and the associated frequency-dependent measuring signal, from which the frequency-dependent transfer function is determined.
6. The method according to at least one of the preceding claims, **characterised in that** the averaged frequency-dependent transfer function is determined in terms of a real-time measurement for the linear time-invariant system.
7. An evaluation device for determining an averaged frequency-dependent transfer function for a perturbed linear time-invariant system, comprising:
 - a plurality of input channels configured to receive frequency-dependent reference signals derived from excitation signals acting upon a linear time-invariant system and frequency-dependent measuring signals, wherein the frequency-dependent measuring signals are determined for an excitation of the linear time-invariant system with the excitation signals and are associated with the frequency-dependent reference signals, and
 - an evaluation unit coupled to the several input channels and configured to determine an averaged frequency-dependent transfer function for the linear time-invariant system, in that using signal deconvolution of mutually associated measuring signals and reference signals from the frequency-dependent measuring signals and reference signals, frequency-dependent transfer functions are block-wise determined such that from each block of associated measuring signals and reference signals a respective transfer function is determined and the frequency-dependent transfer functions are averaged, wherein when the averaged frequency-dependent transfer function is determined at least a part of the determined frequency-dependent transfer functions is included in the averaging corresponding to a respectively associated frequency-dependent weighting.
8. A computer program product with program code which is optionally stored on a computer-readable storage medium and is suitable, when run on a computing device to perform a process according to one of the claims 1 to 6.

Revendications

- 5 1. Procédé destiné à déterminer la moyenne d'une fonction de transmission dépendant de la fréquence pour un système linéaire défaillant, invariant dans le temps au moyen d'un dispositif d'évaluation (3), le procédé comprenant les étapes suivantes:
- de la mise à disposition de signaux de référence dépendant de la fréquence sur une entrée du dispositif d'évaluation (3), sachant que les signaux de référence dépendant de la fréquence sont dérivés de signaux d'excitation appliqués sur un système linéaire invariant dans le temps,
 - 10 - de la mise à disposition de signaux de mesure dépendant de la fréquence sur l'entrée du dispositif d'évaluation (3), sachant que les signaux de mesure dépendant de la fréquence pour le système linéaire invariant dans le temps sont déterminés suite à une excitation du système linéaire invariant dans le temps, via les signaux d'excitation et sont associés aux signaux de référence dépendant de la fréquence et
 - 15 - de la détermination de la moyenne d'une fonction de transmission dépendant de la fréquence pour le système linéaire invariant dans le temps, en ce qu'en utilisant un déploiement de signaux de mesure et de référence réciproquement associés, on détermine par blocs à partir des signaux de mesure et de référence dépendant de la fréquence des fonctions de transmission dépendant de la fréquence, de telle sorte qu'à partir d'un bloc de signaux de mesure et de référence réciproquement associés, il soit déterminé chaque fois une fonction de transmission et que la moyenne des fonctions de transmission dépendant de la fréquence soit calculée,
 - 20
- lors de la détermination de la moyenne de la fonction de transmission dépendant de la fréquence, au moins une partie des fonctions de transmission dépendant de la fréquence déterminées étant prise en compte dans le calcul de la moyenne, conformément à une pondération respectivement associée.
- 25 2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** lors de la détermination de la moyenne de la fonction de transmission dépendant de la fréquence, on calcule la moyenne d'une fonction de transmission dépendant de la fréquence existante et d'une fonction de transmission dépendant de la fréquence actuellement déterminée, sachant que la fonction de transmission dépendant de la fréquence actuellement déterminée est prise en compte dans le calcul de la moyenne, conformément à la pondération dépendant de la fréquence associée.
- 30 3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce qu'on** pondère l'au moins une partie de la fonction de transmission dépendant de la fréquence déterminée chaque fois conformément à une fonction de valeur seuil dépendant de la fréquence.
- 35 4. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, dans la mesure où elle se réfère à la revendication 2, **caractérisé en ce qu'on** pondère l'au moins une partie des plusieurs fonctions de transmission dépendant de la fréquence chaque fois conformément à une fonction d'écart métrique dépendant de la fréquence, sachant que la fonction d'écart métrique indique la pondération dépendant de la fréquence en fonction d'un écart métrique entre la fonction de transmission dépendant de la fréquence existante dont on a calculé la moyenne et la
- 40 fonction de transmission dépendant de la fréquence actuellement déterminée.
5. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'on** pondère l'au moins une partie de la fonction de transmission dépendant de la fréquence déterminée chaque fois conformément à une fonction de corrélation dépendant de la fréquence, sachant que la fonction de corrélation indique la pondération dépendant de la fréquence pour une fonction de transmission dépendant de la fréquence, en fonction d'une corrélation entre le signal de référence dépendant de la fréquence et le signal de mesure dépendant de la fréquence associé, à partir desquels la fonction de transmission dépendant de la fréquence est déterminée.
- 45 6. Procédé selon au moins l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'on** détermine la moyenne de la fonction de transmission dépendant de la fréquence dans le cadre d'une mesure en temps réel pour le système linéaire invariant dans le temps.
- 50 7. Dispositif d'évaluation destiné à déterminer la moyenne d'une fonction de transmission dépendant de la fréquence pour un système linéaire défaillant, invariant dans le temps, avec :
- 55
- plusieurs canaux d'entrée qui sont configurés pour réceptionner des signaux de référence dépendant de la fréquence, qui sont dérivés de signaux d'excitation appliqués sur un système linéaire invariant dans le temps et des signaux de mesure dépendant de la fréquence qui sont déterminés pour le système linéaire invariant

EP 2 441 274 B1

dans le temps, suite à une excitation du système linéaire invariant dans le temps à l'aide des signaux d'excitation et qui sont associés aux signaux de référence dépendant de la fréquence,

- une unité d'évaluation qui est couplée sur les plusieurs canaux d'entrée et qui est configurée pour déterminer la moyenne d'une fonction de transmission dépendant de la fréquence pour le système linéaire invariant dans le temps en ce qu'en utilisant un déploiement de signaux de mesure et de référence réciproquement associés à partir des signaux de mesure et de référence dépendant de la fréquence, des fonctions de transmission dépendant de la fréquence sont déterminées par blocs, de telle sorte qu'à partir d'un bloc de signaux de mesure et de référence réciproquement associés, il est déterminé chaque fois une fonction de transmission et en ce que la moyenne des fonctions de transmission dépendant de la fréquence est calculée, sachant que lors de la détermination de la moyenne des fonctions de transmission dépendant de la fréquence, au moins une partie des fonctions de transmission dépendant de la fréquence déterminées est prise en compte dans le calcul de la moyenne conformément à une pondération dépendant de la fréquence respectivement associée.

8. Produit de programme informatique avec un code programme qui est mémorisé au choix sur un milieu de mémoire lisible par ordinateur et qui est adapté, lors de l'exécution sur un dispositif informatique pour réaliser un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6.

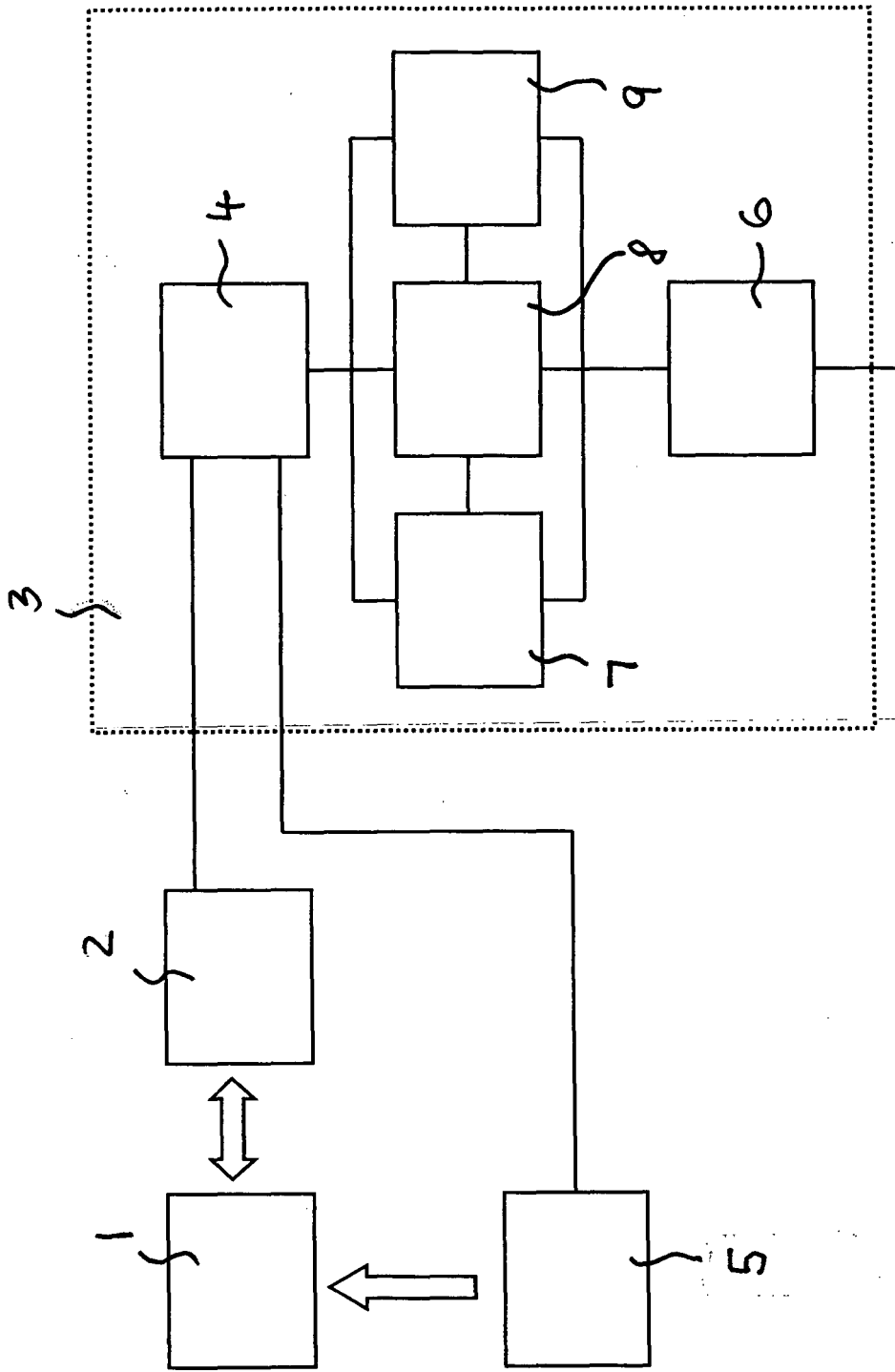


Fig. 1

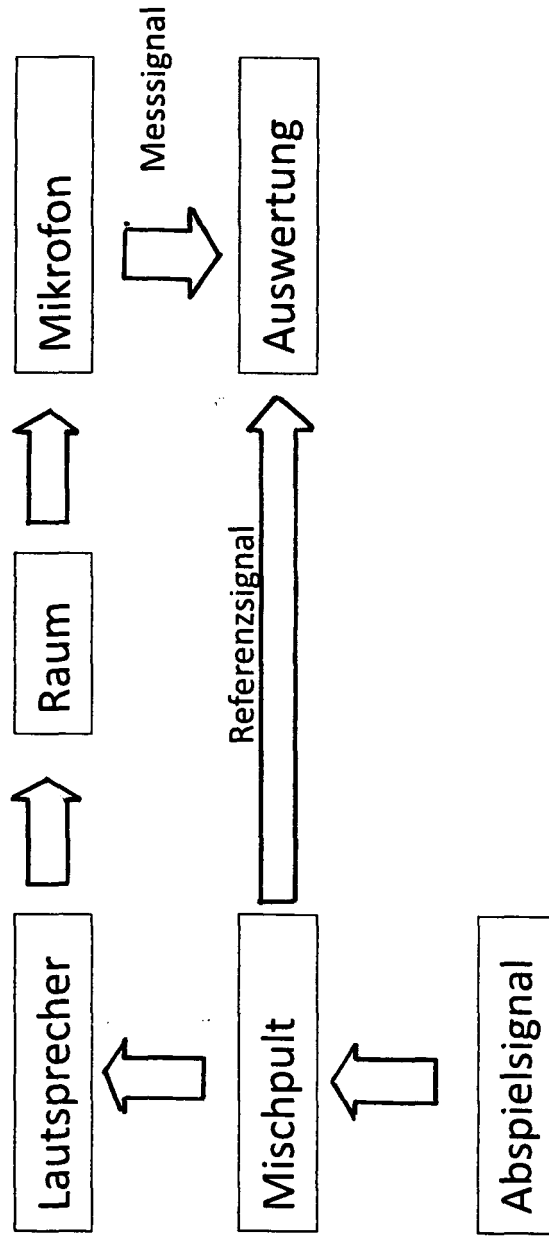


Fig. 2

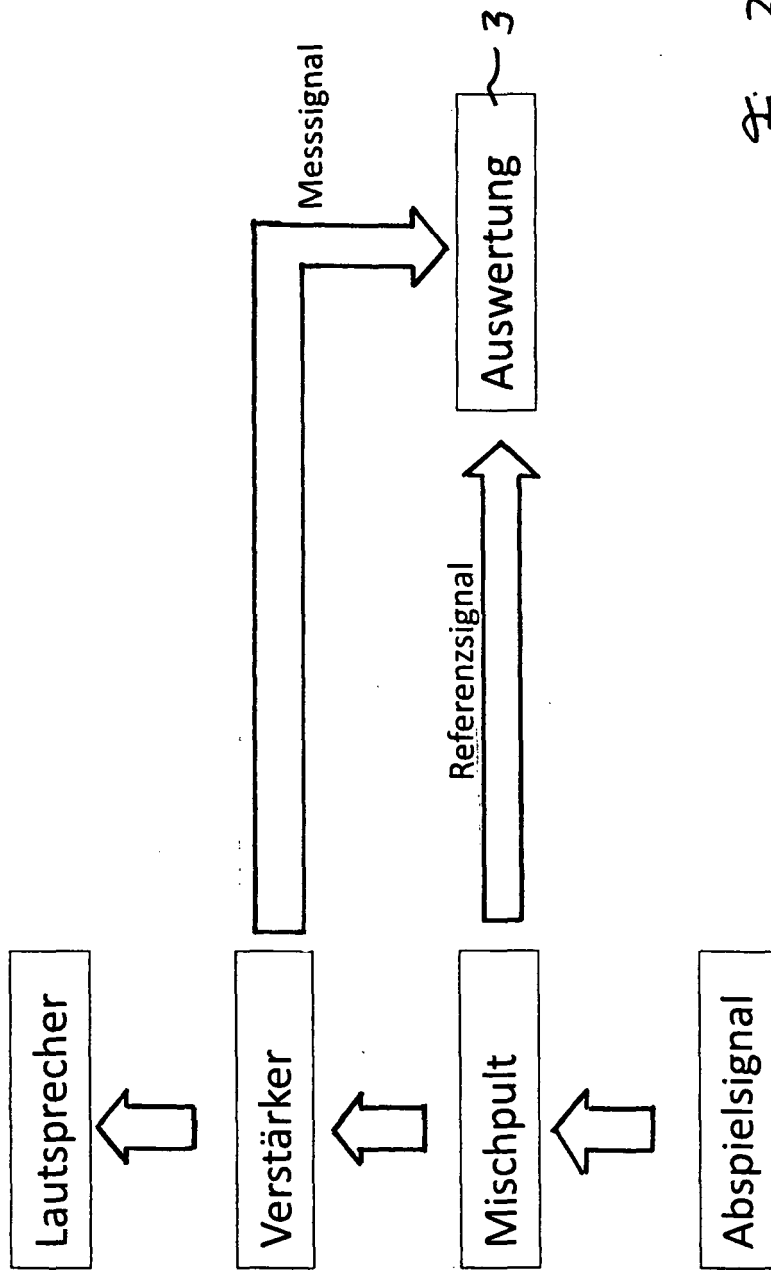


Fig. 3

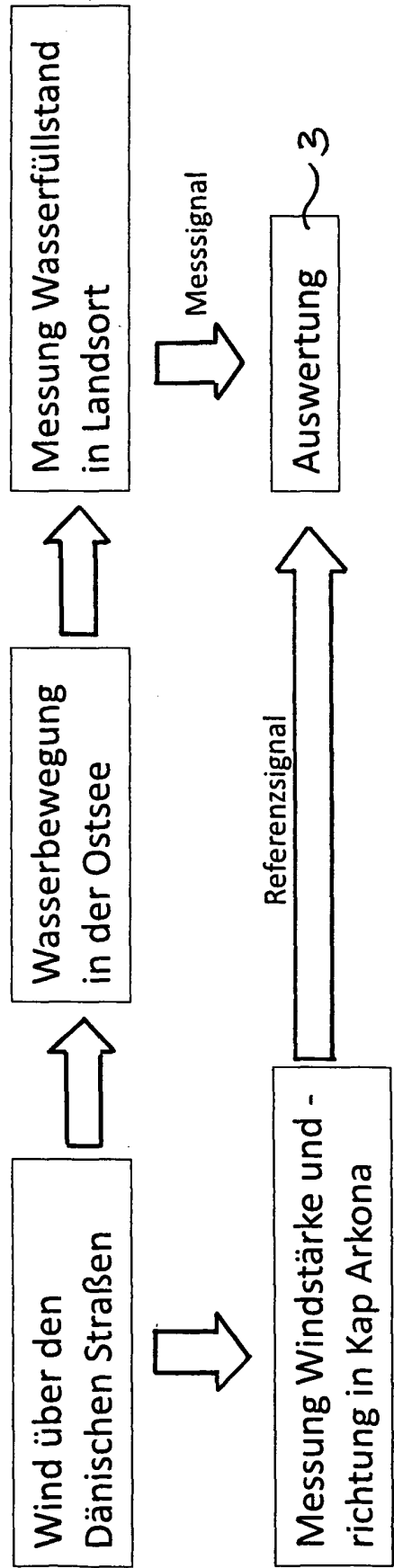


Fig. 4

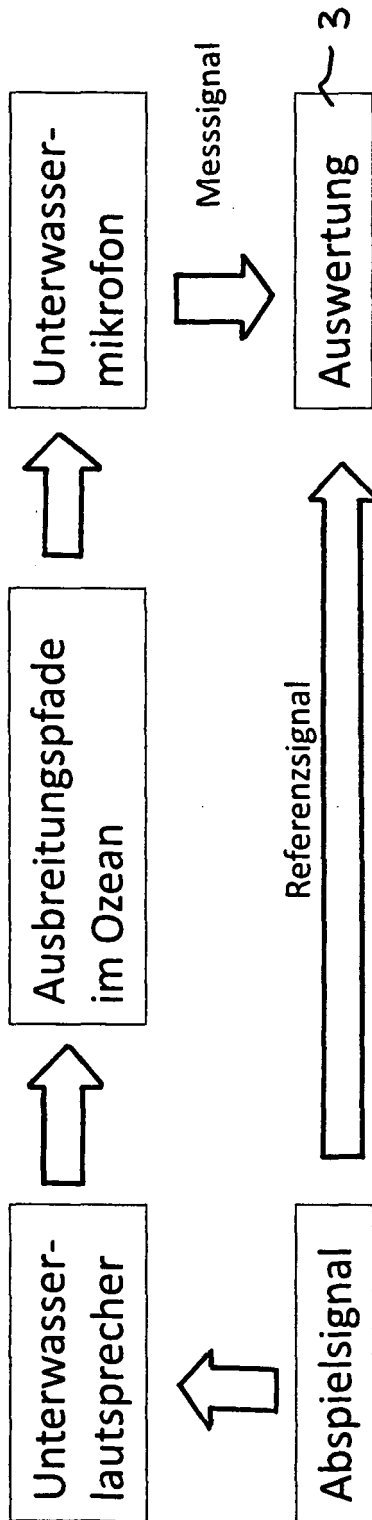


Fig. 5

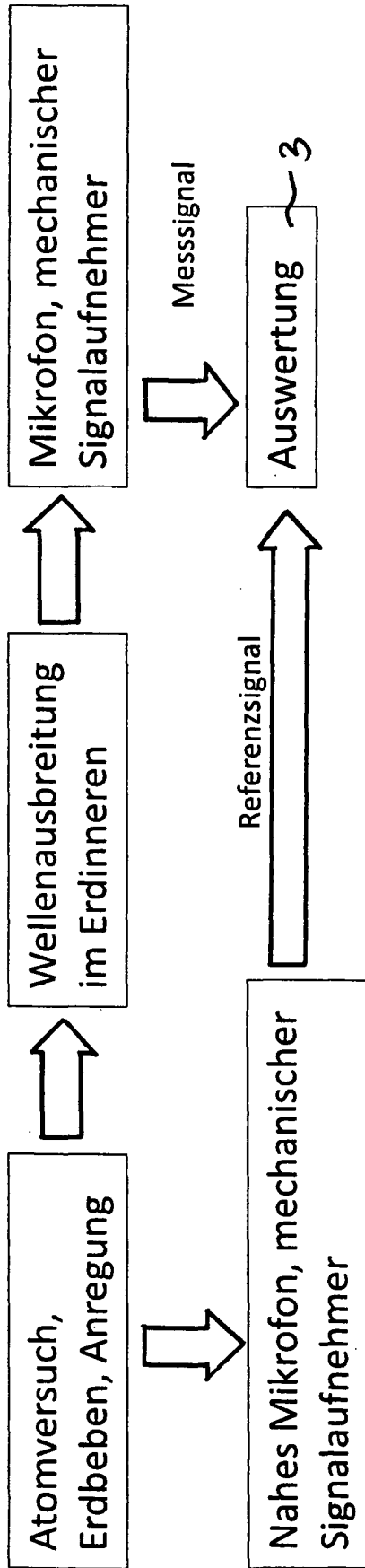


Fig. 6

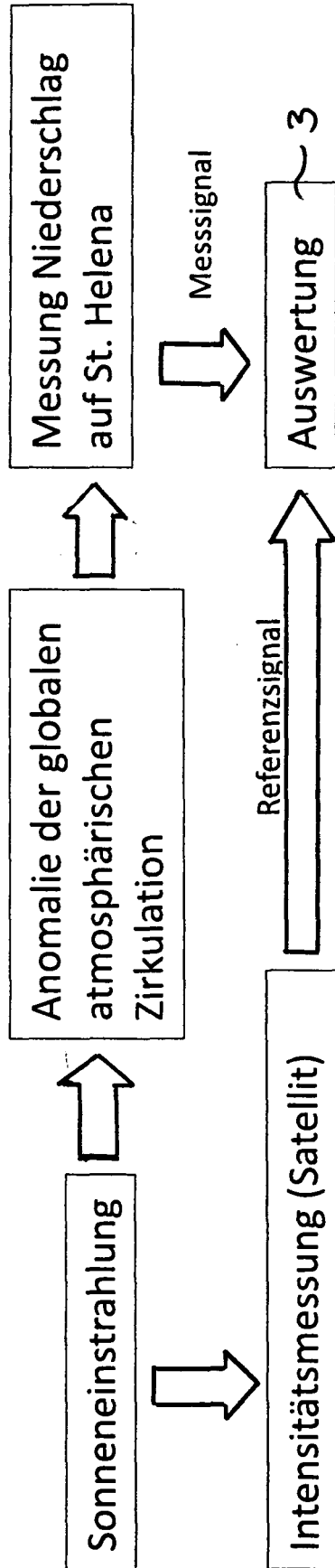


Fig. 7

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 2313141 [0006]
- DE 102006004105 A1 [0007]
- US 4628530 A [0008]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **AHNERT et al.** *Software-based Live sound Measurements, Part 2* [0009]
- *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 03. Juni 1995, vol. 44 (3 [0010]
- **B. BUTTKUS.** *Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics.* Springer-Verlag, 2000 [0029]