

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
19.10.2011 Patentblatt 2011/42

(51) Int Cl.:
G10K 11/178 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **11161701.5**

(22) Anmeldetag: **08.04.2011**

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

• **Hamburg Innovation GmbH**
21079 Hamburg (DE)

(72) Erfinder:
• **Böhme, Sten**
24106, Kiel (DE)
• **Sachau, Delf**
22047, Hamburg (DE)

(30) Priorität: **08.04.2010 DE 102010014226**

(71) Anmelder:
• **Helmut-Schmidt-Universität**
22043 Hamburg (DE)

(74) Vertreter: **UEXKÜLL & STOLBERG**
Patentanwälte
Beselerstraße 4
22607 Hamburg (DE)

(54) **Verfahren und System zur aktiven Lärmreduktion**

(57) Zur aktiven Lärmreduktion des Schallfeldes einer Primärschallquelle (1) wird mit einem Referenzsensor (2) ein die schallerzeugende Bewegung ihrer Abstrahlfläche kennzeichnende physikalische Größe gemessen, um einen zeitabhängigen, die Phaseninformation der Primärschallquelle (1) enthaltenden Referenzparameter $q_{PQ}(t)$ zu erhalten, und für eine Sekundärschallquelle (6) wird mit einem in unmittelbarer Nähe angeordneten Schalldrucksensor (7) zeitabhängig der Schalldruck $p(t)$ gemessen. Durch Transformation von $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in den Frequenzbereich werden komplexe

frequenzabhängige Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $p_{tm}(f_j)$ für Frequenzen f_j und Zeitintervalle t_m erhalten, und die Sekundärschallquelle (6) wird so angesteuert, dass die Sekundärschallquelle (6) gleich- oder gegenphasig zur Primärschallquelle (1) schwingt und ihre schallerzeugende Bewegung in Zeitabschnitten T_n durch einen Verlauf $q_{SQ}(t)$ von q gekennzeichnet ist, bei dem zwischen den entsprechenden komplexen Amplituden $q_{SQ,tm}(f_j)$ und den komplexen Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ die Beziehung $q_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) q_{PQ,tm}(f_j)$ mit in T_n jeweils zeitlich konstanten reellen Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ besteht.

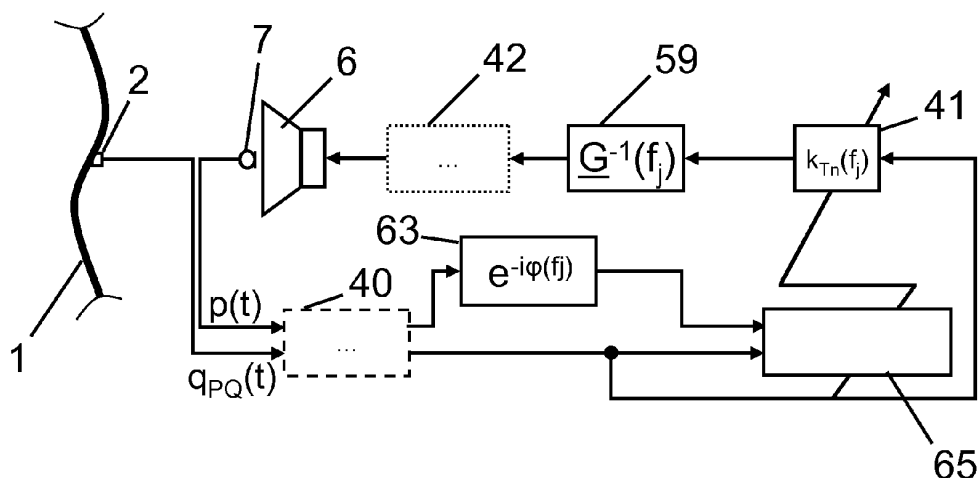


Fig. 5

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur aktiven Lärmreduktion des von einer schwingenden Abstrahlfläche einer Primärschallquelle erzeugten Schallfeldes und auf ein aktives Lärmreduktionssystem zur Durchführung eines derartigen Verfahrens.

[0002] Aktive Lärmreduktionssysteme und -verfahren, die auch als Gegenschallsysteme bzw. -verfahren bezeichnet werden, setzen zur Reduktion des von einer auch als Primärschallquelle bezeichneten Lärmquelle abgestrahlten Primärschalls typischerweise einen oder mehrere Sekundärschallquellen in Form von Lautsprechern, einen oder mehrere Sensoren und eine Steuereinrichtung ein, die mit den Lautsprechern und den Sensoren verbunden ist. Die Steuereinrichtung steuert die Lautsprecher auf Basis der von den Sensoren gelieferten Signale so an, dass das gesamte durch die Kombination der Primärschallquelle und der Lautsprecher erzeugte Schallfeld im Sinne des Ziels der Schallreduktion günstig beeinflusst wird. Dabei können ein oder mehrere Sensoren zur Erzeugung von Referenzsignalen dienen, auf deren Basis Ansteuersignale für die Sekundärschallquellen bestimmt werden, und ein oder mehrere weitere Sensoren können als Fehlersensoren dienen, mit deren Hilfe die Güte der Ansteuersignale überprüft und deren Bestimmung bei Bedarf angepasst wird.

[0003] Die erwünschte Beeinflussung des Schallfeldes kann auf verschiedenen physikalischen Mechanismen beruhen. Neben dem bekanntesten Fall von destruktiven Interferenzen ist es auch möglich, dass Schall an den Orten der Sekundärschallquellen reflektiert wird, dass Schall von den Sekundärschallquellen absorbiert und die Schallenergie über die entsprechenden Aktuatoren dissipiert wird oder dass sich die Primärschallquelle und die Sekundärschallquellen derart gegenseitig beeinflussen, dass die von der Kombination aus Primär- und Sekundärschallquellen abgestrahlte gesamte Schallleistung minimiert wird. Für den letzteren Fall bewirkt die gegenseitige Beeinflussung eine Verringerung der Fähigkeit der Schallquellen zur Abstrahlung von Schall. Dies kann beispielsweise darauf beruhen, dass die Sekundärschallquellen den Wirkwiderstand der Primärschallquelle verringern, indem sie über die akustischen Moden des Schallfeldes auf diese einwirken oder in der Weise auf die vor der Primärschallquelle befindlichen Luftmoleküle einwirken, dass sie der Bewegung der Abstrahlfläche der Primärschallquelle weniger Widerstand entgegenbringen. Dabei besteht stets die Schwierigkeit, dass der Beitrag der Sekundärschallquellen zum Schallfeld die erzielten Vorteile nicht in negativer Weise überkompensieren darf.

[0004] Eine bekannte Art und Weise der aktiven Lärmreduktion setzt zum Beispiel als Sensoren ein oder mehrere Fehlermikrofone ein, die jeweils lokal den Schalldruck messen, der durch sämtliche vorhandenen Schallquellen, einschließlich der Primärschallquelle und einer oder mehrerer Sekundärschallquellen, erzeugt wird. Die Messergebnisse werden durch die Steuereinrichtung verarbeitet, die die Sekundärschallquellen dann so ansteuert, dass der Schalldruck an den Mikrofonen durch destruktive Interferenz und/oder Schallreflexion an den Orten der Sekundärschallquellen möglichst weit minimiert wird. Dadurch kann eine lokale Lärmreduktion an den Mikrofonpositionen erzielt werden. Dieses Prinzip, das ein Beispiel für eine schalldruckbasierte Steuerung ist, hat den Nachteil, dass die lokale Lärmreduktion an den Mikrofonpositionen im Allgemeinen mit einer Lärmverstärkung in anderen Bereichen einhergeht. Ferner wird lediglich die lokale Schallwirkung in Form des Schalldrucks beeinflusst, ohne die Ursache in Form der Schallleistungsabstrahlung durch die Primärschallquelle zu bekämpfen.

[0005] Weitere beispielhafte schalldruckbasierte Steuerungen, die unter anderem aus Elliot, S.J. et al., In Flight Experiments on the Active Control of Propeller-induced Cabin Noise, Journal of Sound and vibration (1990), Nr. 140(2), Seiten 219 bis 238 bekannt sind und das Ziel einer globalen Lärmreduktion haben, basieren auf dem Mechanismus der Einwirkung auf die Primärschallquelle über akustische Moden und haben den Nachteil, dass die Anzahl und Verteilung der Mikrofone so gewählt werden muss, dass eine Erfassung der angeregten Moden möglich ist. Ferner ist der Anwendungsbereich dadurch eingeschränkt, dass für jeden Anwendungsfall separat Kenntnisse über die physikalischen Wechselbeziehungen der verwendeten Lautsprecher und Sensoren und über das Primärschallfeld vorhanden sein müssen.

[0006] Insgesamt müssen für eine globale Schalldruckminimierung in Fällen höherer modaler Dichte in nachteiliger Weise die Mikrofone ebenfalls global verteilt und die Sekundärschallquellen so angeordnet sein, dass sie dieselben Moden wie die Primärschallquelle anregen können. Dabei ist es zudem problematisch, sich ändernden Umwelteinflüssen bei der Implementierung der Steuerung Rechnung zu tragen. Weil die Mikrofone den Gesamtschalldruck messen, können diese Verfahren ferner bei Anwesenheit zusätzlicher Lärmquellen versagen, da die Steuerung den Beitrag der verschiedenen Schallquellen nicht berücksichtigen kann. Trotz dieser Nachteile werden auf Schalldruckmessungen basierende Steuerungen am häufigsten angewendet, da die notwendigen Messungen technisch einfach zu realisieren sind.

[0007] Im Unterschied dazu sind Messung von Energiegrößen des Schallfeldes vom Prinzip her besser geeignet, um im Rahmen von Steuerungen zum Einsatz zu kommen, die eine globale Reduktion von Lärm durch die Minimierung der abgestrahlten Wirkleistung aller im Raum befindlichen Schallquellen erreichen sollen. Dabei besteht der Vorteil, dass die entsprechenden Fehlersensoren in der Nähe der Sekundärschallquellen angeordnet sein können, wodurch der Installations- und Optimierungsaufwand verringert werden kann. Die entsprechenden Vorschläge im Stand der Technik weisen jedoch erhebliche Probleme auf, die dazu geführt haben, dass sie das akademische Versuchsstadium nicht verlassen haben. Die Probleme entstehen teilweise dadurch, dass Energiegrößensensoren, wie beispielsweise Schal-

Intensitätssensoren, hardwaremäßig aufwändiger als einfache Schalldrucksensoren sind und die Komplexität der Steuerungen aufgrund einer größeren Anzahl von Eingangsgrößen (die Schallintensität wird beispielsweise durch den Schalldruck und die Schallschnelle bestimmt) und damit verbundenen mehrkanaligen Ausgestaltungen erhöht ist.

[0008] Ein Ansatz für eine energiebasierte Steuerung ist beispielsweise aus den Dokumenten Elliott, S.J. et al., Power output minimization and power absorption in the active control of sound, Journal of the Acoustical Society of America (1991), Nr. 90(5), Seiten 2501 bis 2512 und Bullmore, A.J. et al, The active minimization of harmonic enclosed sound fields, Part I-III, Journal of Sound and Vibration (1987), Nr. 117, Seiten 1 bis 58 bekannt. Dort wird auf Grundlage von theoretischen Herleitungen für das Beispiel von zwei Punktschallquellen beschrieben, dass die abgestrahlte Gesamtwirkleistung eines Schallquellenpaares aus einer Primärquelle und einer Sekundärquelle genau dann minimal ist, wenn die Sekundärquelle gleich- oder gegenphasig angesteuert wird, bzw. in Bezug auf die Primärquelle gleich- oder gegenphasig schwingt, und die Sekundärquelle keine Wirkschallleistung abstrahlt. Die Wirkschallleistung ist dabei der Realteil der üblicherweise durch eine komplexe Größe dargestellten Gesamtschallleistung und entspricht dem tatsächlichen Nettoenergietransport pro Sekunde senkrecht zu einer Fläche, wie etwa der Abstrahlfläche einer Schallquelle. Demgegenüber ist die durch den Imaginärteil der Gesamtschallleistung dargestellte Blindschallleistung auf den Energietransport durch Mediumsmasse zurückzuführen, die lediglich mitbewegt, aber nicht komprimiert wird. In diesen Dokumenten werden jedoch keine realisierbaren Vorschläge für die Auswahl, Ausgestaltung und Anordnung von Sensoren und für die Ausgestaltung der Steuerung gemacht.

[0009] Experimentelle Untersuchungen zu diesem Ansatz sind in den beiden Dokumenten Tohyama, M., Suzuki, A, Sugiyama, K., Active Power Minimization of a Sound Source in a Reverberant Closed Space, IEEE Transactions on Signal Processing (1991), Nr. 39(1), Seiten 246 bis 248 und Kang, S.W., Kim, Y.H., Active global noise control by sound power, ACTIVE 95: Proceedings of the 1995 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Newport Beach (U.S.A.), New York, Noise Control Foundation, 1995 beschrieben.

[0010] In beiden Fällen werden baugleiche Lautsprecher als Primär- und Sekundärquelle verwendet. Dabei wird die Sekundärquelle mit einem in Bezug auf das Ansteuersignal für die Primärquelle entweder gleich- oder gegenphasigen Ansteuersignal (im Falle des ersteren Dokuments) oder einem in Bezug auf das Ansteuersignal für die Primärquelle gegenphasigen Ansteuersignal (im Falle des letzteren Dokuments) angesteuert, so dass auf die Baugleichheit nicht verzichtet werden kann, und die Amplitude des Ansteuersignals für die Sekundärquelle wird manuell eingestellt. Ferner kommen als Sensoren entweder eine große Anzahl zufällig im Raum verteilter Mikrofone bzw. ein Schallintensitätssensor aus zwei voneinander beabstandeten Mikrofonen zum Einsatz. Dies bedeutet einen relativ hohen Hardwareaufwand. Schließlich werden insgesamt keine realisierbaren Ansätze für eine geeignete Steuerung angegeben.

[0011] Es ist Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und ein System zur aktiven Lärmreduktion des von einer schwingenden Abstrahlfläche einer Primärschallquelle erzeugten Schallfeldes anzugeben, die eine energiebasierte Steuerung zur Minimierung der durch eine Primärschallquelle und eine Sekundärschallquelle abgestrahlten Wirkschallleistung verwirklichen und die Möglichkeiten zum Einsatz dieses Ansatzes gegenüber dem Stand der Technik erweitern.

[0012] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zur aktiven Lärmreduktion gemäß Anspruch 1 und ein aktives Lärmreduktionssystem gemäß Anspruch 9 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens und des Systems sind Gegenstand der jeweils zugehörigen Unteransprüche.

[0013] Das erfindungsgemäße Verfahren ist zur aktiven Lärmreduktion des von einer schwingenden Abstrahlfläche einer Primärschallquelle erzeugten Schallfeldes ausgestaltet. Dazu wird für die Primärschallquelle mit einem - beispielsweise an dieser angeordneten - Referenzsensor zeitabhängig eine physikalische Größe q gemessen, die - zumindest in einem vorbestimmten, zur Lärmreduktion vorgesehenen Frequenzbereich - die schallerzeugende Bewegung der Abstrahlfläche der Primärschallquelle kennzeichnet. Diese Größe kann in vorteilhafter Weise beispielsweise eine Beschleunigung oder eine Schnelle der oder an der schallabstrahlenden Fläche einer Schallquelle sein. Insbesondere Beschleunigungsaufnehmer sind kostengünstig, zuverlässig und einfach aufgebaut. Die zeitabhängige Messung ergibt einen entsprechenden zeitabhängigen Referenzparameter $q_{PQ}(t)$, der einfach die zeitlich variierenden Messwerte darstellt, wie zum Beispiel die zeitabhängige Beschleunigung der schallabstrahlenden Fläche, und die Phaseninformation der Primärschallquelle beinhaltet.

[0014] Zur Minimierung der abgestrahlten Wirkschallleistung ist eine Sekundärschallquelle vorgesehen und geeignet angeordnet, die bevorzugt durch einen Lautsprecher gebildet wird. Im Allgemeinen wird der Einfluss der Sekundärschallquelle auf die Schallabstrahlung durch die Primärschallquelle mit zunehmender Entfernung zwischen den beiden Schallquellen abnehmen. Es ist daher von Vorteil, die Schallquellen in räumlicher Nähe zueinander anzuordnen, bevorzugt in einem gegenseitigen Abstand, der die Hälfte der Wellenlänge - bzw. bei mehreren Wellenlängen die Hälfte der kleinsten Wellenlänge - des auszulöschenden Schalls nicht überschreitet. Mit einem in unmittelbarer Nähe einer Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle und bevorzugt auf oder ungefähr auf der Strahlmittellachse der Abstrahlfläche angeordneten Schalldrucksensor wird - zumindest in einem vorbestimmten, zur Lärmreduktion vorgesehenen Frequenzbereich - zeitabhängig der Schalldruck $p(t)$ gemessen. Es ist bevorzugt, dass der Abstand zwischen dem Schalldrucksensor und der Abstrahlfläche den Wert von einem Zehntel der Wellenlänge - bzw. bei mehreren Wellenlängen einem Zehntel der kleinsten Wellenlänge - des auszulöschenden Schalls nicht überschreitet. In einer bevorzugten Ausführ-

rungsform ist der Schalldrucksensor ein Mikrofon.

[0015] Die zeitabhängigen Messgrößen $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ werden durch ein geeignetes Verfahren in den Frequenzbereich transformiert, so dass für jedes einer Vielzahl von diskreten und bevorzugt unmittelbar aufeinanderfolgenden Zeitintervallen t_m jeweils eine Anzahl von komplexen frequenzabhängigen Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $p_{tm}(f_j)$ für eine Anzahl und - obwohl es prinzipiell auch denkbar ist, nur eine einzige Frequenz zu berücksichtigen, d.h. nur Schall einer einzigen Frequenz zu reduzieren - bevorzugt eine Vielzahl von Frequenzen f_j erhalten werden. Dabei bezeichnen hier genau wie im weiteren Verlauf der Anmeldung unterstrichene Symbole komplexwertige Größen, während nicht unterstrichene Symbole reelle Größen bezeichnen. Die Frequenzen f_j werden im Allgemeinen diskrete Frequenzen sein, die jeweils ein Frequenzband repräsentieren. Es ist jedoch prinzipiell auch denkbar kontinuierliche oder quasikontinuierliche Frequenzwerte zu verwenden. Die komplexen Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $p_{tm}(f_j)$ für ein bestimmtes Zeitintervall t_m sind dann in üblicher Weise für den zeitlichen Verlauf von $q_{PQ}(t)$ bzw. $p(t)$ in diesem Zeitintervall t_m charakteristisch (zumindest in einem vorbestimmten, zur Lärmreduktion vorgesehenen Frequenzbereich) und können durch reziproke Rücktransformation in den Zeitbereich wieder in die entsprechenden Zeitsignale überführt werden. Die Gesamtheit der Frequenzen f_j bestimmt dabei den zur Lärmreduktion vorgesehenen Frequenzbereich.

[0016] Die Sekundärschallquelle wird mit einem zeitabhängigen Ansteuersignal in der Weise angesteuert, dass die Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle zumindest bei den Frequenzen f_j gleich- oder gegenphasig zur Abstrahlfläche der Primärschallquelle schwingt und ihre entsprechende schallerzeugende Bewegung in jedem von unmittelbar aufeinanderfolgenden diskreten Zeitabschnitten T_n , die jeweils eines oder mehrere der diskreten Zeitintervalle t_m umfassen, durch einen bestimmten zeitlichen Verlauf $q_{SQ}(t)$ der physikalischen Größe q gekennzeichnet ist. Es ist zu beachten, dass das Ansteuersignal nicht etwa selbst den Verlauf $q_{SQ}(t)$ haben muss und im allgemeinen nicht hat, sondern so ausgestaltet und erzeugt wird, dass die Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle gemäß $q_{SQ}(t)$ schwingt. Dabei besteht zwischen den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $q_{SQ,tm}(f_j)$, die durch eine Transformation von $q_{SQ}(t)$ in den Frequenzbereich mit Hilfe des obigen Transformationsverfahrens erhalten würden, und den komplexen Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ für die Frequenzen f_j in den diskreten Zeitabschnitten T_n jeweils die Beziehung

$$\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j),$$

wobei $k_{Tn}(f_j)$ reelle Verstärkungsfaktoren sind, die in jedem Zeitabschnitt T_n zeitlich konstant sind. Sie können für jede Frequenz f_j identisch sein, sind aber bevorzugt für die Frequenzen f_j unterschiedlich, um die erzielbaren Ergebnisse zu verbessern. Durch die Bedingung, dass die $k_{Tn}(f_j)$ reell sind, wird die gleich- oder gegenphasige Schwingung der Sekundärschallquelle gewährleistet, d.h. dass die Schwingungen der Abstrahlflächen von Primär- und Sekundärschallquelle bei jeder Frequenz f_j um 0° bzw. um 180° phasenverschoben sind. Dabei entsprechen Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j) > 0$ einer gegenphasigen Schwingung und $k_{Tn}(f_j) < 0$ einer gegenphasigen Schwingung, und es ist bevorzugt, den Aufbau so zu wählen, dass die letztere Bedingung zutrifft, die insbesondere durch die oben bereits angesprochene bevorzugte relative räumliche Anordnung von Primär- und Sekundärschallquelle in einem gegenseitigen Abstand, der die Hälfte der Wellenlänge - bzw. bei mehreren Wellenlängen die Hälfte der kleinsten Wellenlänge - des auszulöschenden Schalls nicht überschreitet, erfüllt wird. Es ist darauf hinzuweisen, dass es grundsätzlich auch denkbar ist, dass die Verstärkungsfaktoren einiger Frequenzen f_j negativ und anderer Frequenzen f_j positiv sind.

[0017] Ferner werden die Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ für die verschiedenen Zeitabschnitte T_n neu berechnet und eingestellt, wobei bei Vorliegen bestimmter Bedingungen ggf. für eine oder mehrere der Frequenzen f_j auf die Neuberechnung verzichtet werden kann. Die Neuberechnung erfolgt jeweils für einen Zeitabschnitt T_{n+1} ausgehend von den Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ in dem unmittelbar vorhergehenden Zeitabschnitt T_n und den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $p_{tm}(f_j)$ für ein Zeitintervall t_m in dem Zeitabschnitt T_n (es ist auch möglich, aber nicht bevorzugt, die Neuberechnung für den Zeitabschnitt T_{n+1} ausgehend von einem weiter zurückliegenden Zeitabschnitt T_{n-x} durchzuführen; in diesem Fall wären im folgenden die entsprechenden Bezugnahmen auf T_n durch T_{n-x} zu ersetzen). Zur Neuberechnung wird die Aktualisierungsgleichung

$$k_{Tn+1}(f_j) = -\mu \operatorname{Im}[\underline{q}_{PQ,tm}(f_j) \underline{p}_{tm}(f_j)^*] + k_{Tn}(f_j)$$

verwendet, wobei μ ein reeller Konvergenzfaktor ist und wie im weiteren Verlauf der Anmeldung $\operatorname{Im}[x]$ den Imaginärteil einer komplexen Zahl x und x^* die zu einer komplexen Zahl x komplex konjugierte Zahl bezeichnet.

[0018] Es kann gezeigt werden, dass diese Aktualisierungsgleichung bei stationärer Primärschallquelle zu der optimalen globalen Lösung für die Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ konvergiert, um die gewünschte gleich- oder gegenphasige Ansteuerung der Sekundärschallquelle ohne Wirkleistungsabstrahlung der Sekundärschallquelle zu erreichen. Dabei

kann durch Variation des Konvergenzfaktors μ das Konvergenzverhalten angepasst werden, d.h. die Konvergenz in weniger Schritten aber größeren Sprüngen oder in mehr Schritten aber kleineren Sprüngen zu erreichen. Ein geeigneter Wert für den Konvergenzfaktor μ kann beispielsweise bestimmt werden, indem er ausgehend von dem Wert 0, der einer unendlich langsamen Konvergenz entspricht, schrittweise geändert wird, bis eine für den jeweiligen Anwendungsfall erwünschte Konvergenzgeschwindigkeit erreicht wird. Dabei ist p im Allgemeinen negativ. Als Grenze kann in Fällen, in denen die Größe q eine Beschleunigung oder eine Schnelle ist, beispielsweise das Inverse des Imaginärteils der Übertragungszahl zwischen Sekundärschleunigung und Sekundärdruck bzw. das Inverse des Realteils der Übertragungsimpedanz zwischen Sekundärschnelle und Sekundärdruck angenommen werden.

[0019] Die Aktualisierungsgleichung und die entsprechende adaptive Steuerung haben den Vorteil, dass sie neben einem Referenzsignal lediglich die Messung eines einzelnen Schalldrucks erfordern. Daher kann der Hardwareaufwand gering gehalten und insbesondere ein einkanaliges System verwendet werden, das neben einer geeigneten Steuereinrichtung bzw. Steuer- und Regeleinrichtung z.B. lediglich einen Referenzsensor, wie etwa einen Beschleunigungsaufnehmer, ein Mikrofon und einen Lautsprecher aufweist. Sowohl die Sekundärschallquelle als auch die Sensoren können in vorteilhafter Weise in der Nähe des Schalltransmissionspfads der Primärschallquelle angeordnet werden. Die Sekundärschallquelle kann anders aufgebaut sein als die Primärschallquelle, so dass flexibel verschiedene geeignete Lautsprecher verwendet werden können. Ferner ist die Steuerung einfach und gegenüber sich ändernden Umweltbedingungen unempfindlich, d.h. es ist keine erneute Systemkalibrierung notwendig. Das Verfahren ist sowohl in Innenräumen als auch im Freien universell anwendbar, und es hat sich gezeigt, dass insbesondere bei Lärm, der durch konphas schwingende Oberflächen erzeugt wird, eine erhebliche globale Absenkung des Schalldruckpegels erreicht werden kann. So wurde beispielsweise bei Verwendung eines Lautsprechers mit einer Membranfläche von 0,01 m² als Sekundärschallquelle für eine tonale Schallabstrahlung in einem Raum mit einem Volumen von 400 m³ durch eine 4,8 m² große Struktur eine durchschnittliche globale Lärmpegelreduktion von 8 dB gemessen. Das Verfahren ist insbesondere für stationären Lärm geeignet, und es ist bevorzugt, dass die Primärschallquelle eine Schallquelle ist, die stationären Lärm erzeugt.

[0020] In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass es selbstverständlich möglich ist, mehr als eine Sekundärschallquelle vorzusehen, um verschiedene Bereiche einer die Primärschallquelle darstellenden Struktur oder Konstruktion in der beschriebenen Weise zu berücksichtigen.

[0021] In einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens sind die Zeitintervalle t_m , die zur Neuberechnung der Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ herangezogen werden, zeitlich voneinander beabstandet. Auf diese Weise werden Störungen in dem Verfahren vermieden, die dadurch entstehen können, dass die für die Neuberechnung und Neueinstellung der Verstärkungsfaktoren notwendigen Berechnungen und Signalverarbeitungen zu einer zeitlichen Verzögerung führen können und die Neueinstellung sich demzufolge nicht sofort auswirkt.

[0022] Es ist bevorzugt, dass die Neuberechnung der Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ nur für Frequenzen f_j durchgeführt wird, für die die Bedingung

$$|\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)| \geq \varepsilon_j$$

mit vorbestimmten Schwellenwerten ε_j gilt, und für die übrigen Frequenzen f_j die Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ auf Null gesetzt werden. Mit anderen Worten muss der Referenzparameter einen bestimmten Schwellenwert überschreiten, damit für die entsprechende Frequenz überhaupt ein neuer Verstärkungsfaktor berechnet wird. Dadurch kann die Ansteuerung der Sekundärschallquelle für wenig Lärm oder ohne vorhandenes Referenzsignal verhindert werden. Es wird nur die Lärmquelle aktiv in der Abstrahlung unterdrückt, bei der das System installiert ist, während Schall anderer Quellen keinen Einfluss auf das Verfahren und sein Ergebnis hat. Außerdem kann durch Wahl von ε_j der Bereich eingestellt werden, ab dem eine aktive Lärmunterdrückung ökonomisch sinnvoll ist. ε_j kann für die unterschiedlichen Frequenzen f_j unterschiedlich gewählt werden oder als Konstante über alle Frequenzen vorgegeben werden.

[0023] Es ist ferner bevorzugt, dass nach jeder Neuberechnung eines Verstärkungsfaktors $k_{Tn+1}(f_j)$ dessen Betrag begrenzt wird, indem geprüft wird, ob er einen vorbestimmten Maximalwert $k_{\max}(f_j)$ für den Betrag überschreitet, und $k_{Tn+1}(f_j)$ bei Überschreitung in Abhängigkeit davon, ob $k_{Tn+1}(f_j)$ negativ oder positiv ist, auf $-k_{\max}(f_j)$ bzw. $+k_{\max}(f_j)$ gesetzt wird. Dieser Grenzwert kann beispielsweise durch

$$k_{\max}(f_j) = A_{\max,fj} / |\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)|$$

vorgegeben werden, wobei $A_{\max,fj}$ die maximal zulässige Amplitude der Sekundäransteuerung bei der Frequenz f_j ist. $k_{\max}(f_j)$ wird in diesem Fall automatisch an die Amplitude des zur Verfügung stehenden Referenzsignals angepasst.

Durch Vorgabe von Schwellenwerten kann eine Überlastung der Sekundärschallquelle verhindert werden.

[0024] In einer bevorzugten Verfahrensausgestaltung wird die Transformation von $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in den Frequenzbereich zur Bestimmung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ und $p_{tm}(f_j)$ mittels diskreter Fouriertransformation durchgeführt. Zu diesem Zweck müssen $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in geeigneter Weise zeitdiskretisiert werden.

[0025] In einer vorteilhaften Ausführungsform weist die Erzeugung des zeitabhängigen Ansteuersignals für die Sekundärschallquelle die Schritte auf, für jedes der Zeitintervalle t_m aus den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ und den entsprechenden Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ für den Zeitabschnitt T_n für die Frequenzen f_j komplexe frequenzabhängige Amplituden $q_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$$

zu berechnen und auf Basis der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ mit Hilfe einer entsprechenden komplementären Rücktransformation in den Zeitbereich den zeitabhängigen Ansteuerparameter $q_{SQ}(t)$ zu erhalten, der die zu erzielende schallerzeugende Bewegung der Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle kennzeichnet. Wird zur Transformation in den Frequenzbereich in bevorzugter Weise eine diskrete Fouriertransformation verwendet, wird die Rücktransformation in dieser Ausführungsform auf Basis der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ in den Zeitbereich zur Bestimmung des zeitabhängigen Ansteuerparameters $q_{SQ}(t)$ mittels inverser diskreter Fouriertransformation durchgeführt.

[0026] In dieser Ausführungsform werden ferner bevorzugt nach jeder Berechnung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ für ein Zeitintervall t_m die komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{q}'_{SQ,tm}(f_j) = \underline{G}^{-1}(f_j) \underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$$

angepasst und die angepassten komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}'_{SQ,tm}(f_j)$ für die Rücktransformation in den Zeitbereich zur Bestimmung des zeitabhängigen Ansteuerparameters $q_{SQ}(t)$ verwendet. Dabei ist $\underline{G}^{-1}(f_j)$ ein vorbestimmter komplexer Zeitverzögerungskorrekturparameter, mit dessen Hilfe Phasenverschiebungen berücksichtigt werden können, die durch Signalverarbeitungsschritte und elektroakustische Umwandlungen verursacht werden können. Derartige Zeitverzögerungen und die damit unter Umständen verbundenen zusätzlichen Phasenverschiebungen können ansonsten dazu führen, dass die Abstrahlflächen von Primär- und Sekundärschallquelle bei der genannten Vorgehensweise nicht wie gewünscht gleich- oder gegenphasig schwingen. Der Zeitverzögerungskorrekturparameter kann im Verlaufe einer anfänglichen Systemkalibrierung bestimmt werden und ist ansonsten unabhängig von sich ändernden Umgebungsbedingungen.

[0027] Es ist vorteilhaft, wenn die Bestimmung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{p}_{tm}(f_j)$ für jedes Zeitintervall t_m jeweils den Schritt aufweist, aus der Transformation in den Frequenzbereich erhaltene komplexe frequenzabhängige Amplituden $\underline{p}'_{tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{p}_{tm}(f_j) = e^{-i \varphi(f_j)} \underline{p}'_{tm}(f_j)$$

anzupassen. Der Sensorphasenkorrekturparameter $\varphi(f_j)$ berücksichtigt, dass sich durch eine unterschiedliche Bauart des Referenzsensors und des Schalldrucksensors unterschiedliche Phasengänge und demzufolge eine Phasenverschiebung zwischen $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ bzw. den entsprechenden frequenzabhängigen komplexen Amplituden ergeben kann, die - wie sich aus der Aktualisierungsgleichung unmittelbar ergibt - in nachteiliger Weise die Berechnung der optimalen Verstärkungsfaktoren unmittelbar beeinflusst. Der Sensorphasenkorrekturparameter $\varphi(f_j)$ kann im Verlaufe einer anfänglichen Systemkalibrierung durch Bestimmung der tatsächlichen Phasenlage der durch die Sensoren gemessenen physikalischen Größen bestimmt werden und ist ansonsten unabhängig von sich ändernden Umgebungsbedingungen.

[0028] Das beschriebene Verfahren und seine vorteilhaften Ausgestaltungen können bevorzugt mit Hilfe eines aktiven Lärmreduktionssystems durchgeführt werden, das im folgenden beschrieben wird. Zur Vermeidung von Wiederholungen wird auf Einzelheiten des Verfahrens, die sich auf den Betrieb des Systems beziehen, nicht mehr detailliert eingegangen.

[0029] Das System weist einen Referenzsensor, bevorzugt einen Beschleunigungssensor oder einen Schnellesensor

für die schallabstrahlende Fläche einer Schallquelle, zur zeitabhängigen Messung einer physikalischen Größe q auf, die - zumindest in einem vorbestimmten, zur Lärmreduktion vorgesehenen Frequenzbereich - die schallerzeugende Bewegung der Abstrahlfläche der Primärschallquelle kennzeichnet. Dabei ist der Referenzsensor angepasst, um im Betrieb einen entsprechenden zeitabhängigen Referenzparameter $q_{PQ}(t)$, der die Phaseninformation der Primärschallquelle beinhaltet, in Form eines entsprechenden Referenzsignals bereitzustellen. Der Referenzsensor kann beispielsweise an der Primärschallquelle angeordnet oder zu einer solchen Anordnung vorgesehen sein.

[0030] Ferner weist das System eine Sekundärschallquelle, z.B. in Form eines Lautsprechers, mit einer zur Schallabstrahlung geeigneten Abstrahlfläche und einen Schalldrucksensor, der bevorzugt ein Mikrofon ist, zur zeitabhängigen Messung des Schalldrucks $p(t)$ - zumindest in einem vorbestimmten, zur Lärmreduktion vorgesehenen Frequenzbereich - auf, der in unmittelbarer Nähe der Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle angeordnet ist oder für eine solche Anordnung angepasst ist. Dabei ist der Schalldrucksensor angepasst, um im Betrieb ein entsprechendes Schalldrucksignal bereitzustellen. Wie oben bereits erläutert wurde, ist es bevorzugt, dass der Abstand zwischen dem Schalldrucksensor und der Abstrahlfläche im Betrieb den Wert von einem Zehntel der Wellenlänge - bzw. bei mehreren Wellenlängen einem Zehntel der kleinsten Wellenlänge - des auszulöschenden Schalls nicht überschreitet. Oben wurde auch bereits angegeben, dass es von Vorteil ist, wenn die Schallquellen im Betrieb in räumlicher Nähe zueinander angeordnet sind, bevorzugt in einem gegenseitigen Abstand, der die Hälfte der Wellenlänge - bzw. bei mehreren Wellenlängen die Hälfte der kleinsten Wellenlänge - des auszulöschenden Schalls nicht überschreitet.

[0031] Schließlich weist das System eine Steuereinrichtung bzw. Steuer- und Regeleinrichtung und bevorzugt eine digitale Steuereinrichtung bzw. Steuer- und Regeleinrichtung, die z.B. einen geeignet programmierten Prozessor aufweist, mit Eingängen zum Empfang des Referenzsignals und des Schalldrucksignals und einem Ausgang zur Ausgabe eines zeitabhängigen Ansteuersignals für die Sekundärschallquelle auf. Die Steuereinrichtung ist angepasst, um im Betrieb in der bereits erläuterten Weise

- $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in den Frequenzbereich zu transformieren, so dass für jedes von diskreten Zeitintervallen t_m jeweils eine Anzahl von komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ für eine Anzahl und bevorzugt eine Vielzahl von Frequenzen f_j erhalten werden,
- das zeitabhängige Ansteuersignal in der Weise zu erzeugen, dass die Abstrahlfläche der mit dem Ansteuersignal angesteuerten Sekundärschallquelle zumindest bei den Frequenzen f_j gleich- oder gegenphasig zur Abstrahlfläche der Primärschallquelle schwingt und ihre entsprechende schallerzeugende Bewegung in jedem von aufeinanderfolgenden diskreten Zeitabschnitten T_n , die jeweils eines oder mehrere der diskreten Zeitintervalle t_m umfassen, durch einen zeitlichen Verlauf $q_{SQ}(t)$ der physikalischen Größe q gekennzeichnet ist, bei dem zwischen den einer Transformation von $q_{SQ}(t)$ in den Frequenzbereich entsprechenden komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ und den komplexen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ für die Frequenzen f_j in den diskreten Zeitabschnitten T_n jeweils die Beziehung

$$\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$$

mit den in jedem Zeitabschnitt T_n zeitlich konstanten reellen Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ besteht, auf die oben bereits ausführlich eingegangen worden ist, und

- jeweils ausgehend von den Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ in einem Zeitabschnitt T_n und den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ für ein Zeitintervall t_m in dem Zeitabschnitt T_n die Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ für den nächsten Zeitabschnitt T_{n+1} für zumindest eine der Frequenzen f_j durch die Aktualisierungsgleichung

$$k_{Tn+1}(f_j) = -\mu \operatorname{Im}[\underline{q}_{PQ,tm}(f_j) \underline{p}_{tm}(f_j)^*] + k_{Tn}(f_j)$$

neu zu berechnen und einzustellen, wobei μ ein reeller Konvergenzfaktor ist und $\operatorname{Im}[x]$ den Imaginärteil einer komplexen Zahl x und x^* die zu einer komplexen Zahl x komplex konjugierte Zahl bezeichnet.

[0032] Zu diesem Zweck weist die Steuereinrichtung bevorzugt jeweils eine oder mehrere für die genannten Schritte eingerichtete Einrichtungen auf.

[0033] In diesem Zusammenhang ist wieder darauf hinzuweisen, dass es selbstverständlich möglich ist, mehr als eine Sekundärschallquelle vorzusehen, um verschiedene Bereiche einer die Primärschallquelle darstellenden Struktur oder

Konstruktion in der beschriebenen Weise berücksichtigen zu können.

[0034] Das System ist insbesondere für stationären Lärm geeignet, und es ist bevorzugt, dass die Primärschallquelle eine Schallquelle ist, die stationären Lärm erzeugt.

[0035] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Steuereinrichtung so eingerichtet, dass die Zeitintervalle t_m , die zur Neuberechnung der Verstärkungsfaktoren $k_{T_{n+1}}(f_j)$ herangezogen werden, zeitlich voneinander beabstandet sind.

[0036] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Steuereinrichtung so eingerichtet, dass die Neuberechnung der Verstärkungsfaktoren $k_{T_{n+1}}(f_j)$ nur für Frequenzen f_j durchgeführt wird, für die

$$|\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)| \geq \varepsilon_j$$

mit vorbestimmten Schwellenwerten ε_j gilt, und für die übrigen Frequenzen f_j die Verstärkungsfaktoren $k_{T_{n+1}}(f_j)$ auf Null gesetzt werden.

[0037] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Steuereinrichtung angepasst, um nach jeder Neuberechnung eines Verstärkungsfaktors $k_{T_{n+1}}(f_j)$ dessen Betrag zu begrenzen, indem sie prüft, ob dieser Betrag einen vorbestimmten Maximalwert $k_{\max}(f_j)$ für den Betrag überschreitet, und $k_{T_{n+1}}(f_j)$ bei Überschreitung in Abhängigkeit davon, ob $k_{T_{n+1}}(f_j)$ negativ oder positiv ist, auf $-k_{\max}(f_j)$ bzw. $+k_{\max}(f_j)$ setzt. Eine Möglichkeit zur Festsetzung dieser Grenzwerte ist oben erläutert worden.

[0038] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Steuereinrichtung angepasst, um zur Erzeugung des zeitabhängigen Ansteuerparameters für die Sekundärschallquelle für jedes der Zeitintervalle t_m aus den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ und den entsprechenden Verstärkungsfaktoren $k_{T_n}(f_j)$ für den Zeitabschnitt T_n für die Frequenzen f_j komplexe frequenzabhängige Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{T_n}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$$

zu berechnen und auf Basis der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ mit Hilfe einer Rücktransformation in den Zeitbereich den zeitabhängigen Ansteuerparameter $q_{SQ}(t)$ zu erhalten, der die zu erzielende schallerzeugende Bewegung der Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle kennzeichnet. In diesem Fall ist es bevorzugt, wenn die Steuereinrichtung ferner angepasst ist, um die Transformation von $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in den Frequenzbereich zur Bestimmung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ und $\underline{p}_{tm}(f_j)$ mit Hilfe diskreter Fouriertransformation durchzuführen. Insbesondere ist es dann auch zusätzlich bevorzugt, wenn die Steuereinrichtung angepasst ist, um die Rücktransformation auf Basis der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ in den Zeitbereich zur Bestimmung des zeitabhängigen Ansteuerparameters $q_{SQ}(t)$ mit Hilfe inverser diskreter Fouriertransformation durchzuführen.

[0039] In dieser Ausführungsform ist es auch von Vorteil, wenn die Steuereinrichtung angepasst ist, um nach jeder Berechnung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{T_n}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ für ein Zeitintervall t_m die komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{q}'_{SQ,tm}(f_j) = \underline{G}^{-1}(f_j) \underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$$

anzupassen und die angepassten komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}'_{SQ,tm}(f_j)$ für die Rücktransformation in den Zeitbereich zur Bestimmung des zeitabhängigen Ansteuerparameters $q_{SQ}(t)$ zu verwenden, wobei $\underline{G}^{-1}(f_j)$ vorbestimmte komplexe Zeitverzögerungskorrekturparameter zur Berücksichtigung von durch Signalverarbeitung und elektroakustische Umwandlungen verursachte Phasenverschiebungen sind.

[0040] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Steuereinrichtung angepasst, um zur Bestimmung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{p}_{tm}(f_j)$ für jedes Zeitintervall t_m jeweils aus der Transformation in den Frequenzbereich erhaltene komplexe frequenzabhängige Amplituden $\underline{p}'_{tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{p}_{tm}(f_j) = e^{-i \varphi(f_j)} \underline{p}'_{tm}(f_j)$$

mit einem Sensorphasenkorrekturparameter $\varphi(f_j)$ anzupassen.

[0041] Die Steuereinrichtung kann beispielsweise eine hardwaremäßig fest implementierte Vorrichtung mit verschiede-

denen Elementen zur Durchführung der verschiedenen genannten Schritte, eine programmtechnisch zu diesem Zweck angepasste und eingerichtete Vorrichtung, die einen programmierbaren Prozessor und ggf. eine Speichereinrichtung aufweist, oder eine Mischform sei, die einen programmierbaren Prozessor aufweist, aber bei der einzelne Schritte durch hardwaremäßig fest implementierte Elemente durchgeführt werden.

[0042] Im Folgenden wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen auf Grundlage der Zeichnungen weiter erläutert.

Figur 1 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines erfindungsgemäßen aktiven Lärmreduktionssystems.

Figur 2 zeigt ein Flussdiagramm einer bevorzugten Vorgehensweise zur Neuberechnung eines Verstärkungsfaktors $k_{T_{n+1}}(f_j)$ für eine Frequenz f_j mit Hilfe der Aktualisierungsgleichung durch die Steuereinrichtung.

Figur 3 zeigt schematisch eine bevorzugte Anordnung zur Bestimmung eines Zeitverzögerungskorrekturparameters $\underline{G}^{-1}(f_j)$.

Figur 4 zeigt schematisch eine bevorzugte Anordnung zur Bestimmung eines Sensorphasenkorrekturparameters $\varphi(f_j)$.

Figur 5 zeigt schematisch ein Blockschaltbild eines bevorzugten Gesamtsystems.

[0043] In Figur 1 bezeichnet das Bezugszeichen 1 eine Primärschallquelle in Form einer schwingenden Fläche, die die Abstrahlfläche der Schallquelle bildet. An der Oberfläche der Primärschallquelle 1 ist ein als Referenzsensor dienender Beschleunigungsaufnehmer 2 befestigt, mit dem die Beschleunigung q der Abstrahlfläche zeitabhängig als Referenzparameter $q_{PQ}(t)$ gemessen und in Form eines entsprechenden Referenzsignals über eine Referenzsignalleitung 3 einem Referenzsignaleingang 4 einer digitalen Steuer- bzw. Regeleinrichtung 5 zugeleitet wird. Ferner ist ein Lautsprecher 6 vorgesehen, vor dessen Abstrahlfläche, d.h. seiner Lautsprechermembran, in unmittelbarer Nähe auf der Strahlerrichtungsebene ein Schalldrucksensor in Form eines Mikrofons 7 angeordnet ist, mit dem der zeitabhängige Schalldruck $p(t)$ an dem Lautsprecher 6 gemessen und in Form eines entsprechenden Schalldrucksignals über eine Schalldrucksignalleitung 8 einem Schalldrucksignaleingang 9 der digitalen Steuer- bzw. Regeleinrichtung 5 zugeleitet wird.

[0044] Die Steuereinrichtung 5 erzeugt auf Basis des Referenzsignals und des Schalldrucksignals ein zeitabhängiges Ansteuersignal, das an einem Ansteuersignalausgang 10 ausgegeben und mit dem der Lautsprecher 6 über eine Ansteuersignalleitung 11 angesteuert wird. Dabei erzeugt die Steuereinrichtung 5 das Ansteuersignal derart, dass die von dem durch die Primärschallquelle 1 und dem Lautsprecher 6 gebildeten Quellenpaar abgestrahlte Gesamtwirkleistung in der oben beschriebenen Weise minimiert wird. Es wird deutlich, dass das System mit Ausnahme der Ausgestaltung der Steuereinrichtung 5 in seinem grundsätzlichen konstruktiven Aufbau einem einfachen System mit schalldruckbasierter Steuerung unter Verwendung eines einzelnen Mikrofons ähnelt und dementsprechend in vorteilhafter Weise einfach ausgebildet und zu installieren ist.

[0045] In Figur 2 ist ein Flussdiagramm einer in vorteilhafter Weise in der Steuereinrichtung 5 zu implementierenden Vorgehensweise zur Neuberechnung eines Verstärkungsfaktors $k_{T_{n+1}}(f_j)$ für eine Frequenz f_j mit Hilfe der Aktualisierungsgleichung dargestellt. In Schritt 20 werden einmalig vor dem ersten Neuberechnungsschritt verschiedene Parameter initialisiert, deren Bedeutung oben angegeben worden ist oder im Folgenden noch genauer erläutert wird.

[0046] In Schritt 21 werden die beiden von der Steuereinrichtung 5 mit Hilfe diskreter Fouriertransformation (vgl. Figuren 3 und 5) aus $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ für die Frequenz f_j bestimmten komplexen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm,\Delta t_z}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm,\Delta t_z}(f_j)$ in den Verfahrensablauf eingegeben. $\underline{q}_{PQ,tm,\Delta t_z}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm,\Delta t_z}(f_j)$ bezeichnen dabei komplexe Amplituden, die aus den Signalen $q_{PQ}(t)$ bzw. $p(t)$ in einem durch den Parameter z bezeichneten Teilintervall Δt_z des durch den Parameter m bezeichneten Zeitintervalls t_m bestimmt worden sind, wobei jedes Zeitintervall t_m durch z_{max} unmittelbar aufeinanderfolgende Teilintervalle Δt_z gebildet wird. In Schritt 22 werden $\underline{q}_{PQ,tm,\Delta t_z}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm,\Delta t_z}(f_j)$ dann zu den komplexen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ addiert, die in Schritt 20 zunächst auf Null gesetzt wurden. Anschließend wird geprüft, ob z gleich dem Maximalwert z_{max} ist (Schritt 23) und, wenn dies nicht der Fall ist, z um 1 erhöht (Schritt 24) und zu Schritt 21 zurückgesprungen. Dort werden die mit Hilfe diskreter Fouriertransformation für das nächste, durch den neuen Wert von z bezeichnete Teilintervall Δt_z bestimmten komplexen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm,\Delta t_z}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm,\Delta t_z}(f_j)$ in den Verfahrensablauf eingegeben und anschließend in Schritt 22 zu den komplexen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ addiert. Da diese Schleife erst verlassen wird, wenn die Überprüfung in Schritt 23 ergibt, dass der Wert z gleich z_{max} ist, ist ersichtlich, dass in Schritt 22 insgesamt die entsprechenden Summen für alle z_{max} Teilintervalle Δt_z gebildet werden.

[0047] Danach werden diese Summen $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ in Schritt 26 durch z_{max} dividiert, so dass $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ und $\underline{p}_{tm}(f_j)$ anschließend über das Zeitintervall t_m gemittelte Werte für die komplexen Amplituden enthalten. Durch diese Mittelwertbildung wird vermieden, dass die für die Neuberechnung der Verstärkungsfaktoren verwendeten komplexen

Amplituden $q_{PQ,tm}(f_j)$ und $p_{tm}(f_j)$ durch Messfehler oder Artefakte der diskreten Fouriertransformation verfälscht werden.

[0048] In Schritt 27 wird geprüft, ob der Betrag der komplexen Amplitude $q_{PQ,tm}(f_j)$ mindestens gleich einem Schwellenwert ε_j ist, und nur bejahendenfalls wird in Schritt 30 der Verstärkungsparameter $k_{Tn+1}(f_j)$ für den nachfolgenden Zeitabschnitt T_{n+1} gegenüber dem Wert $k_{Tn}(f_j)$ für den Zeitabschnitt T_n neu berechnet. Anderenfalls wird der Verstärkungsparameter $k_{Tn+1}(f_j)$ für den nachfolgenden Zeitabschnitt T_{n+1} auf den Wert Null gesetzt (Schritt 29). Soll eine Neuberechnung durchgeführt werden, wird dies in Schritt 30 unter Verwendung der oben diskutierten Aktualisierungsgleichung $k_{Tn+1}(f_j) = -\mu \operatorname{Im}[q_{PQ,tm}(f_j) p_{tm}(f_j)^*] + k_{Tn}(f_j)$ getan.

[0049] Als nächstes wird in Schritt 31 geprüft, ob der Betrag des Verstärkungsfaktors $k_{Tn+1}(f_j)$ für den nachfolgenden Zeitabschnitt T_{n+1} einen vorbestimmten positiven Maximalwert $k_{max}(f_j)$ überschreitet und ggf. $k_{Tn+1}(f_j)$ unter Erhalt des Vorzeichens betragsmäßig auf diesen begrenzt (Schritt 32).

[0050] In Schritt 33 wird der Verstärkungsfaktor $k_{Tn+1}(f_j)$ für den nachfolgenden Zeitabschnitt T_{n+1} schließlich zur Verwendung durch die Steuereinrichtung 5 bei der Erzeugung des Ansteuersignals für den Lautsprecher 6 ausgegeben.

[0051] Schritt 34 sorgt dafür, dass für einen gewissen Zeitraum t_{pause} keine weitere Aktualisierung durchgeführt wird, um - wie oben beschrieben - sicherzustellen, dass sich der neue Wert des Verstärkungsfaktors vor der nächsten Aktualisierungsberechnung auf die Schallabstrahlung durch den Lautsprecher 6 ausgewirkt hat. Schließlich werden in Schritt 35 die Parameter n , z , $q_{PQ,tm}(f_j)$ und $p_{tm}(f_j)$ für den nächsten Durchlauf reinitialisiert.

[0052] Figur 3 zeigt schematisch eine bevorzugte Anordnung zur Bestimmung eines Zeitverzögerungskorrekturparameters $G^{-1}(f_j)$ für eine oder mehrere der Frequenzen f_j und bevorzugt für jede Frequenz f_j und zeigt gleichzeitig auch die wesentlichen Elemente der Steuereinrichtung 5 zur Erzeugung des Ansteuersignals für den Lautsprecher 6 aus dem Referenzsignal. Diese Elemente umfassen ein Eingangselement 40, ein Multiplikationselement 41 zur Anwendung des Verstärkungsfaktors $k_{Tn}(f_j)$ und ein Ausgangselement 42. Das Eingangselement 40 weist den Referenzsignaleingang 4 auf, und das Ausgangselement 42 weist den Ansteuersignalausgang 10 auf. Ferner weist das Eingangselement 40 einen Ausgang 43 zur Ausgabe der komplexen Amplitude $q_{PQ,tm}(f_j)$ auf, die über das Multiplikationselement 41, in dem sie zur Erzeugung der komplexen Amplitude $q_{SQ,tm}(f_j)$ mit dem Verstärkungsfaktor $k_{Tn}(f_j)$ multipliziert wird, einem Eingang 44 des Ausgangselements 42 zugeleitet wird.

[0053] Durch diese Anordnung wird das Ansteuersignal im Prinzip (unter Vernachlässigung später diskutierter Phasenkorrekturmaßnahmen) erzeugt, indem das Referenzsignal zunächst in dem Eingangselement 40 nacheinander einen Vorverstärker 45, einen Hochpassfilter 46, einen Analog-Digital-Wandler 47 und ein Element 48 zur diskreten Fouriertransformation (DFT) durchläuft, wodurch am Ausgang 43 die komplexe Amplitude $q_{PQ,tm}(f_j)$ erhalten wird. Die dem Eingang 44 zugeleitete komplexe Amplitude $q_{SQ,tm}(f_j)$ durchläuft dann im Ausgangselement 42 nacheinander ein Element 49 zur inversen diskreten Fouriertransformation (IDFT), einen Digital-Analog-Wandler 50, einen Tiefpassfilter 51 und einen Verstärker 52, wodurch am Ausgang 10 das Ansteuersignal erhalten wird. Es ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass das Ansteuersignal nicht etwa selbst den Verlauf $q_{SQ}(t)$ haben muss und im allgemeinen nicht hat, sondern durch geeignete Ausgestaltung des Digital-Analog-Wandlers 50, des Tiefpassfilters 51, des Verstärkers 52 und bei Bedarf ggf. weiterer Elemente so ausgestaltet und erzeugt wird, dass die Abstrahlfläche des Lautsprechers 6 gemäß $q_{SQ}(t)$ schwingt.

[0054] Um nun den Zeitverzögerungskorrekturparameter $G^{-1}(f_j)$ für die Frequenz f_j zu bestimmen, der die Signallaufzeiten innerhalb der gezeigten Elemente berücksichtigt, wird als Primärschallquelle ein Lautsprecher 1' eingesetzt, der baugleich mit dem Sekundärlautsprecher 6 ist und mit Hilfe eines Signalgenerators 53 sinusförmig mit der Frequenz f_j angeregt wird. An der Abstrahlfläche des Sekundärlautsprechers 6 ist ein dem Sensor 2 entsprechender Beschleunigungsaufnehmer 54 angeordnet, dessen Signal über einen weiteren Eingang 55 des Eingangselements 40 in gleicher Weise wie das Referenzsignal nacheinander dessen Vorverstärker 45, Hochpassfilter 46, Analog-Digital-Wandler 47 und das Element 48 zur diskreten Fouriertransformation (DFT) durchläuft, wodurch an einem weiteren Ausgang 56 eine komplexe Vergleichsamplitude $q_{SQ,tm,vgl.}(f_j)$ erhalten wird.

[0055] Es ist ersichtlich, dass dann, wenn das Multiplikationselement 41 vorübergehend auf eine Multiplikation mit 1 eingestellt wird, die durch die Beschleunigungsaufnehmer 2 und 54 gemessenen zeitabhängigen Beschleunigungen $q_{PQ}(t)$ bzw. $q_{SQ}(t)$ identisch sein sollten. Das bedeutet auch, dass die komplexe Amplitude $q_{PQ,tm}(f_j)$ und die komplexe Vergleichsamplitude $q_{SQ,tm,vgl.}(f_j)$ an den Ausgängen 43 bzw. 56 identisch sein sollten. Durch die Signallaufzeiten und das Transmissionsverhalten des Lautsprechers 6 wird dies jedoch nicht der Fall sein. Daher wird mit Hilfe eines Divisionselements 57 der Zeitverzögerungskorrekturparameter $G^{-1}(f_j)$ für eine, mehrere oder jede der Frequenzen f_j gemäß $q_{PQ,tm}(f_j) - G^{-1}(f_j) q_{SQ,tm,vgl.}(f_j)$ bestimmt und zur weiteren Verwendung in einer Speicherstelle 58 gespeichert.

[0056] Figur 4 zeigt eine bevorzugte Anordnung zur Bestimmung eines Sensorphasenkorrekturparameters $\varphi(f_j)$ für die Frequenz f_j , mit dem Phasenfehler aufgrund des bauartbedingten unterschiedlichen Phasengangs des Beschleunigungsaufnehmers 2 und des Mikrofons 7 berücksichtigt werden. Die Anordnung entspricht weitgehend der in Figur 3 gezeigten Anordnung. Zusätzlich enthält sie ein dem Multiplikationselement 41 nachgeschaltetes weiteres Multiplikationselement 59 zur Multiplikation mit dem Zeitverzögerungskorrekturparameter $G^{-1}(f_j)$, d.h. zur Durchführung der Zeitverzögerungskorrektur, die auch als Vorentzerrung für das Referenzsignal bezeichnet werden kann. Da in diesem Fall das Multiplikationselement 41 vorübergehend auf eine Multiplikation mit -1 eingestellt ist, schwingen infolge dieser

Korrektur die Abstrahlflächen der Lautsprecher 1' und 6 gegenphasig und sie strahlen beide keine Wirkschalleistung ab. Ist ihr gegenseitiger Abstand gering, sind die Beschleunigung am Primärlautsprecher 1' und der Schalldruck am Ort des Mikrofons 7 annähernd gleichphasig.

[0057] Daher kann mit Hilfe eines durch ein Divisionselement 60 und ein Phasenwinkelement 61 durchgeführten Vergleichs der Phasenverschiebung zwischen den tatsächlich durch den Beschleunigungsaufnehmer 2 und das Mikrofon 7 gemessenen Werten $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ ein Sensorphasenkorrekturparameter $\phi(f_j)$ bestimmt und in einer Speicherstelle 62 zur weiteren Verwendung gespeichert werden.

[0058] Nach den in den Figuren 3 und 4 dargestellten Systemkalibrierungsmaßnahmen ist das System zum regulären Betrieb bereit. Es ist noch einmal vollständig in der Figur 5 dargestellt, in der im Unterschied zur Figur 4 zusätzlich zu den Multiplikationselementen 41 und 59 ein weiteres Multiplikationselement 63 zur Multiplikation der an einem Druckamplitudenausgang 64 des Eingangselements 40 anliegenden komplexen Druckamplitude $p'_{tm}(f_j)$ mit $e^{-i\phi(f_j)}$ zum Erhalten der komplexen Druckamplitude $p_{tm}(f_j)$ vorgesehen ist. Ferner ist das Aktualisierungselement 65 gezeigt, durch das die Schritte gemäß Figur 2 durchgeführt werden und das Multiplikationselement 41 ggf. über die Leitung 66 auf den aktuellen Wert für den Verstärkungsfaktor eingestellt wird.

Patentansprüche

- Verfahren zur aktiven Lärmreduktion des von einer schwingenden Abstrahlfläche einer Primärschallquelle (1) erzeugten Schallfeldes, bei dem
für die Primärschallquelle (1) mit einem Referenzsensor (2) zeitabhängig eine physikalische Größe q gemessen wird, die die schallerzeugende Bewegung der Abstrahlfläche der Primärschallquelle (1) kennzeichnet, um einen entsprechenden zeitabhängigen Referenzparameter $q_{PQ}(t)$ zu erhalten, der die Phaseninformation der Primärschallquelle (1) beinhaltet,
für eine Sekundärschallquelle (6) mit einem in unmittelbarer Nähe einer Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle (6) angeordneten Schalldrucksensor (7) zeitabhängig der Schalldruck $p(t)$ gemessen wird,
 $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in den Frequenzbereich transformiert werden, so dass für jedes von diskreten Zeitintervallen t_m jeweils eine Anzahl von komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ für eine Anzahl von Frequenzen f_j erhalten werden,
die Sekundärschallquelle (6) mit einem zeitabhängigen Ansteuersignal in der Weise angesteuert wird, dass die Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle (6) gleich- oder gegenphasig zur Abstrahlfläche der Primärschallquelle (1) schwingt und ihre schallerzeugende Bewegung in jedem von aufeinanderfolgenden diskreten Zeitabschnitten T_n , die jeweils eines oder mehrere der diskreten Zeitintervalle t_m umfassen, durch einen zeitlichen Verlauf $q_{SQ}(t)$ der physikalischen Größe q gekennzeichnet ist, bei dem zwischen den einer Transformation von $q_{SQ}(t)$ in den Frequenzbereich entsprechenden komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ und den komplexen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ für die Frequenzen f_j in den diskreten Zeitabschnitten T_n jeweils die Beziehung

$$\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$$

mit den in jedem Zeitabschnitt T_n zeitlich konstanten reellen Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ besteht, wobei jeweils ausgehend von den Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ in einem Zeitabschnitt T_n und den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ für ein Zeitintervall t_m in dem Zeitabschnitt T_n die Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ für den nächsten Zeitabschnitt T_{n+1} für zumindest eine der Frequenzen f_j durch die Aktualisierungsgleichung

$$k_{Tn+1}(f_j) = -\mu \operatorname{Im}[\underline{q}_{PQ,tm}(f_j) \underline{p}_{tm}(f_j)^*] + k_{Tn}(f_j)$$

neu berechnet und eingestellt werden, wobei μ ein reeller Konvergenzfaktor ist und $\operatorname{Im}[\underline{x}]$ den Imaginärteil einer komplexen Zahl $\underline{x}$ und $\underline{x}^*$ die zu einer komplexen Zahl $\underline{x}$ komplex konjugierte Zahl bezeichnet.

- Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die physikalische Größe q eine Beschleunigung oder eine Schnelle der oder an der schallabstrahlenden Fläche einer Schallquelle ist.
- Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Neuberechnung der Verstärkungsfaktoren k_{Tn+1}

(f_j) nur für Frequenzen f_j durchgeführt wird, für die

$$|\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)| \geq \varepsilon_j$$

mit vorbestimmten Schwellenwerten ε_j gilt, und für die übrigen Frequenzen f_j die Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ auf Null gesetzt werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem nach jeder Neuberechnung eines Verstärkungsfaktors $k_{Tn+1}(f_j)$ dessen Betrag begrenzt wird, indem geprüft wird, ob dieser einen vorbestimmten Maximalwert $k_{\max}(f_j)$ für den Betrag überschreitet, und $k_{Tn+1}(f_j)$ bei Überschreitung in Abhängigkeit davon, ob $k_{Tn+1}(f_j)$ negativ oder positiv ist, auf $-k_{\max}(f_j)$ bzw. $+k_{\max}(f_j)$ gesetzt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Erzeugung des zeitabhängigen Ansteuersignals für die Sekundärschallquelle (6) die Schritte aufweist, für jedes der Zeitintervalle t_m aus den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ und den entsprechenden Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ für den Zeitabschnitt T_n für die Frequenzen f_j komplexe frequenzabhängige Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$$

zu berechnen und

auf Basis der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ mit Hilfe einer Rücktransformation in den Zeitbereich den zeitabhängigen Ansteuerparameter $q_{SQ}(t)$ zu erhalten, der die zu erzielende schallerzeugende Bewegung der Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle (6) kennzeichnet.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Transformation von $\underline{q}_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in den Frequenzbereich zur Bestimmung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ und $\underline{p}_{tm}(f_j)$ mittels diskreter Fouriertransformation durchgeführt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 5 und Anspruch 6, bei dem die Rücktransformation auf Basis der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ in den Zeitbereich zur Bestimmung des zeitabhängigen Ansteuerparameters $q_{SQ}(t)$ mittels inverser diskreter Fouriertransformation durchgeführt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, bei dem nach jeder Berechnung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ für ein Zeitintervall t_m die komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{q}'_{SQ,tm}(f_j) = \underline{G}^{-1}(f_j) \underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$$

angepasst und die angepassten komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}'_{SQ,tm}(f_j)$ für die Rücktransformation in den Zeitbereich zur Bestimmung des zeitabhängigen Ansteuerparameters $\underline{q}_{SQ}(t)$ verwendet werden, wobei $\underline{G}^{-1}(f_j)$ vorbestimmte komplexe Zeitverzögerungskorrekturparameter zur Berücksichtigung von durch Signalverarbeitung und elektroakustische Umwandlungen verursachte Phasenverschiebungen sind.

9. Aktives Lärmreduktionssystem zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, das aufweist:

einen Referenzsensor (2) zur zeitabhängigen Messung einer physikalischen Größe q , die die schallerzeugende Bewegung der Abstrahlfläche der Primärschallquelle (1) kennzeichnet, wobei der Referenzsensor (2) angepasst ist, um im Betrieb einen entsprechenden zeitabhängigen Referenzparameter $q_{PQ}(t)$, der die Phaseninformation der Primärschallquelle (1) beinhaltet, in Form eines entsprechenden Referenzsignals bereitzustellen, eine Sekundärschallquelle (6) mit einer zur Schallabstrahlung geeigneten Abstrahlfläche, einen in unmittelbarer Nähe der Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle (6) angeordneten Schalldrucksensor

(7) zur zeitabhängigen Messung des Schalldrucks $p(t)$, wobei der Schalldrucksensor (7) angepasst ist, um im Betrieb ein entsprechendes Schalldrucksignal bereitzustellen,
einer Steuereinrichtung (5) mit Eingängen zum Empfang des Referenzsignals und des Schalldrucksignals und einem Ausgang (10) zur Ausgabe eines zeitabhängigen Ansteuersignals für die Sekundärschallquelle (6), die Steuereinrichtung (5) angepasst ist, um im Betrieb

- $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in den Frequenzbereich zu transformieren, so dass für jedes von diskreten Zeitintervallen t_m jeweils eine Anzahl von komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ für eine Anzahl von Frequenzen f_j erhalten werden,
- das zeitabhängige Ansteuersignal in der Weise zu erzeugen, dass die Abstrahlfläche der mit dem Ansteuersignal angesteuerten Sekundärschallquelle (6) gleich-oder gegenphasig zur Abstrahlfläche der Primärschallquelle (1) schwingt und ihre schallerzeugende Bewegung in jedem von aufeinanderfolgenden diskreten Zeitabschnitten T_n , die jeweils eines oder mehrere der diskreten Zeitintervalle t_m umfassen, durch einen zeitlichen Verlauf $q_{SQ}(t)$ der physikalischen Größe q gekennzeichnet ist, bei dem zwischen den einer Transformation von $q_{SQ}(t)$ in den Frequenzbereich entsprechenden komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ und den komplexen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ für die Frequenzen f_j in den diskreten Zeitabschnitten T_n jeweils die Beziehung

$$\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$$

- mit den in jedem Zeitabschnitt T_n zeitlich konstanten reellen Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ besteht, und
- jeweils ausgehend von den Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ in einem Zeitabschnitt T_n und den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ bzw. $\underline{p}_{tm}(f_j)$ für ein Zeitintervall t_m in dem Zeitabschnitt T_n die Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ für den nächsten Zeitabschnitt T_{n+1} für zumindest eine der Frequenzen f_j durch die Aktualisierungsgleichung

$$k_{Tn+1}(f_j) = -\mu \operatorname{Im}[\underline{q}_{PQ,tm}(f_j) \underline{p}_{tm}(f_j)^*] + k_{Tn}(f_j)$$

neu zu berechnen und einzustellen, wobei μ ein reeller Konvergenzfaktor ist und $\operatorname{Im}[x]$ den Imaginärteil einer komplexen Zahl x und x^* die zu einer komplexen Zahl x komplex konjugierte Zahl bezeichnet.

10. System nach Anspruch 9, bei dem die Neuberechnung der Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ nur für Frequenzen f_j durchgeführt wird, für die

$$|\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)| \geq \varepsilon_j$$

mit vorbestimmten Schwellenwerten ε_j gilt, und für die übrigen Frequenzen f_j die Verstärkungsfaktoren $k_{Tn+1}(f_j)$ auf Null gesetzt werden.

11. System nach Anspruch 9 oder Anspruch 10, bei dem die Steuereinrichtung (5) angepasst ist, um nach jeder Neuberechnung eines Verstärkungsfaktors $k_{Tn+1}(f_j)$ dessen Betrag zu begrenzen, indem sie prüft, ob dieser einen vorbestimmten Maximalwert $k_{\max}(f_j)$ für den Betrag überschreitet, und $k_{Tn+1}(f_j)$ bei Überschreitung in Abhängigkeit davon, ob $k_{Tn+1}(f_j)$ negativ oder positiv ist, auf $-k_{\max}(f_j)$ bzw. $+k_{\max}(f_j)$ setzt.

12. System nach einem der Ansprüche 9 bis 11, bei dem die Steuereinrichtung (5) angepasst ist, um zur Erzeugung des zeitabhängigen Ansteuersignals für die Sekundärschallquelle (6) für jedes der Zeitintervalle t_m aus den komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ und den entsprechenden Verstärkungsfaktoren $k_{Tn}(f_j)$ für den Zeitabschnitt T_n für die Frequenzen f_j komplexe frequenzabhängige Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$$

- 5 zu berechnen und
auf Basis der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ mit Hilfe einer Rücktransformation in den Zeitbereich den zeitabhängigen Ansteuerparameter $q_{SQ}(t)$ zu erhalten, der die zu erzielende schallerzeugende Bewegung der Abstrahlfläche der Sekundärschallquelle (6) kennzeichnet.
- 10 **13.** System nach einem der Ansprüche 9 bis 12, bei dem die Steuereinrichtung (5) angepasst ist, um die Transformation von $q_{PQ}(t)$ und $p(t)$ in den Frequenzbereich zur Bestimmung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ und $\underline{p}_{tm}(f_j)$ mittels diskreter Fouriertransformation durchzuführen.
- 15 **14.** System nach Anspruch 12 und Anspruch 13, bei dem die Steuereinrichtung (5) angepasst ist, um die Rücktransformation auf Basis der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ in den Zeitbereich zur Bestimmung des zeitabhängigen Ansteuerparameters $q_{SQ}(t)$ mittels inverser diskreter Fouriertransformation durchzuführen.
- 20 **15.** System nach einem der Ansprüche 12 bis 14, bei dem die Steuereinrichtung (5) angepasst ist, um nach jeder Berechnung der komplexen frequenzabhängigen Amplituden $q_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j) = k_{Tn}(f_j) \underline{q}_{PQ,tm}(f_j)$ für ein Zeitintervall t_m die komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$ gemäß

$$\underline{q}'_{SQ,tm}(f_j) = \underline{G}^{-1}(f_j) \underline{q}_{SQ,tm}(f_j)$$

- 25 anzupassen und die angepassten komplexen frequenzabhängigen Amplituden $\underline{q}'_{SQ,tm}(f_j)$ für die Rücktransformation in den Zeitbereich zur Bestimmung des zeitabhängigen Ansteuerparameters $q_{SQ}(t)$ zu verwenden, wobei $\underline{G}^{-1}(f_j)$ vorbestimmte komplexe Zeitverzögerungskorrekturparameter zur Berücksichtigung von durch Signalverarbeitung und elektroakustische Umwandlungen verursachte Phasenverschiebungen sind.
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

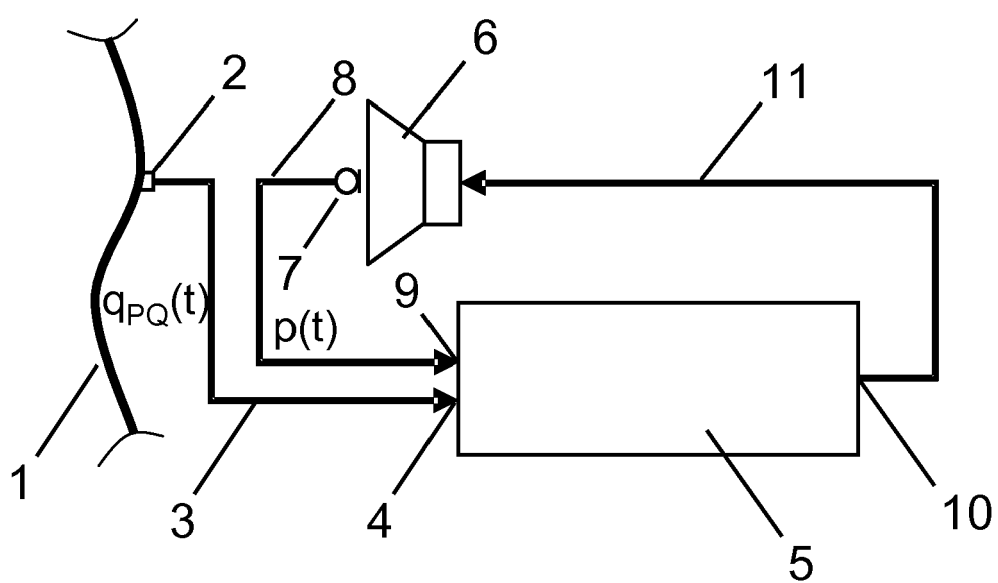


Fig. 1

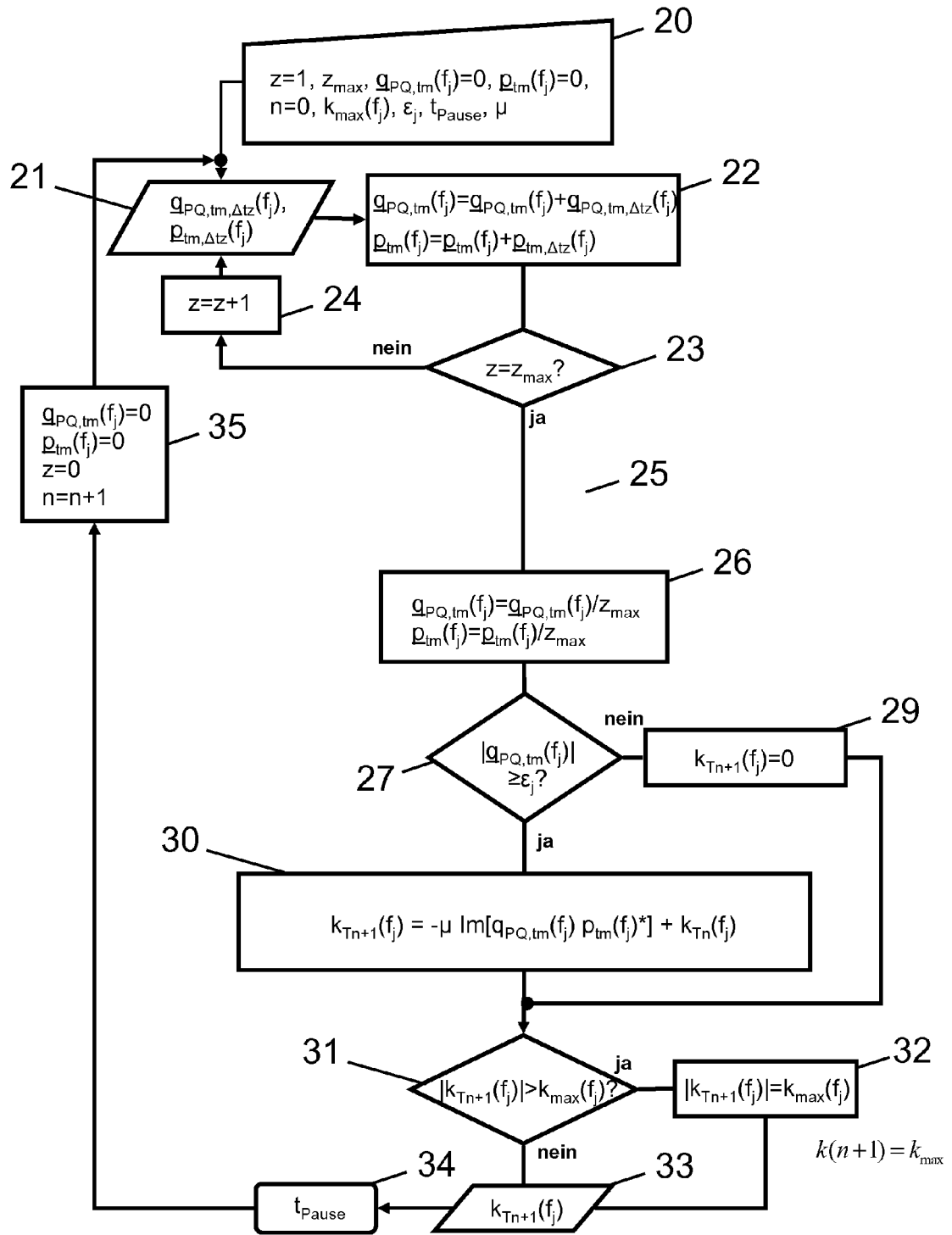


Fig. 2

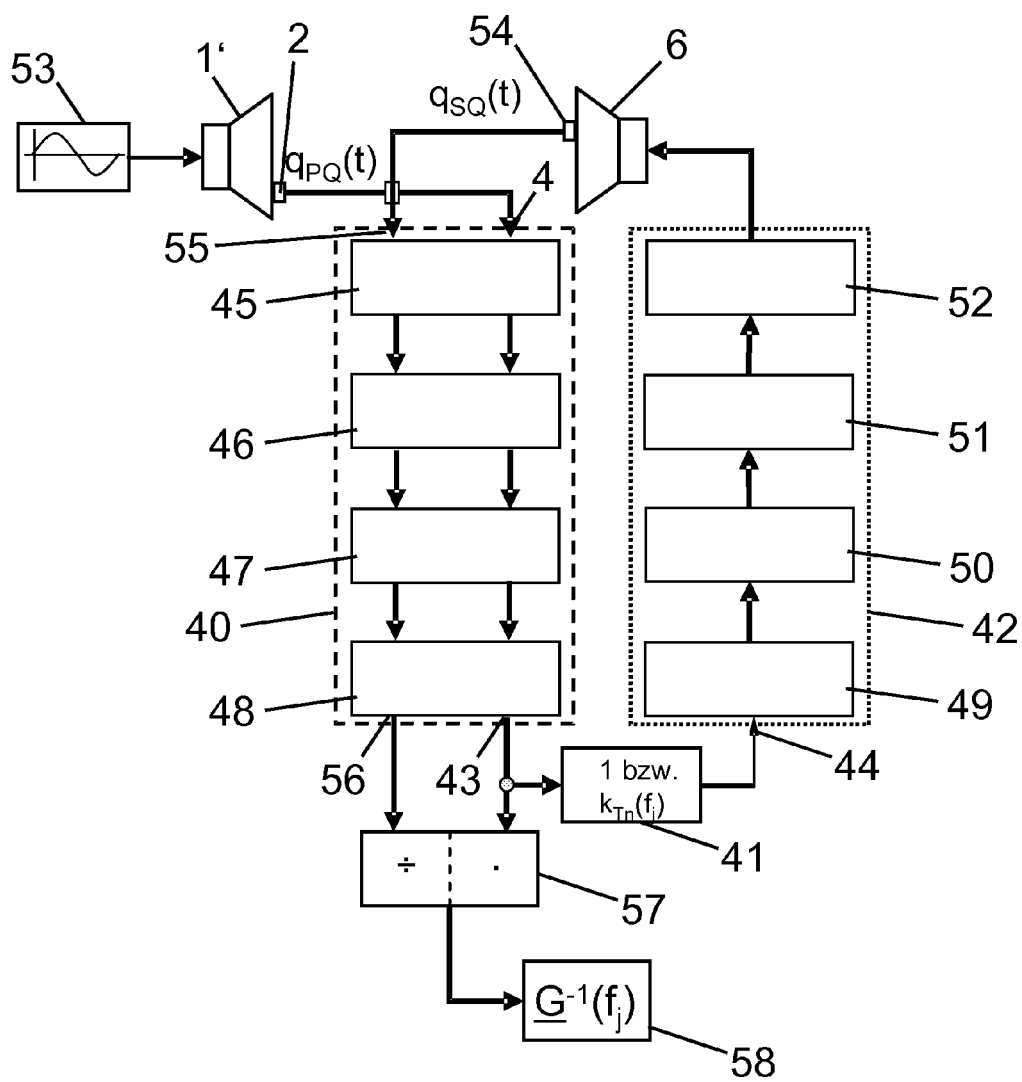


Fig. 3

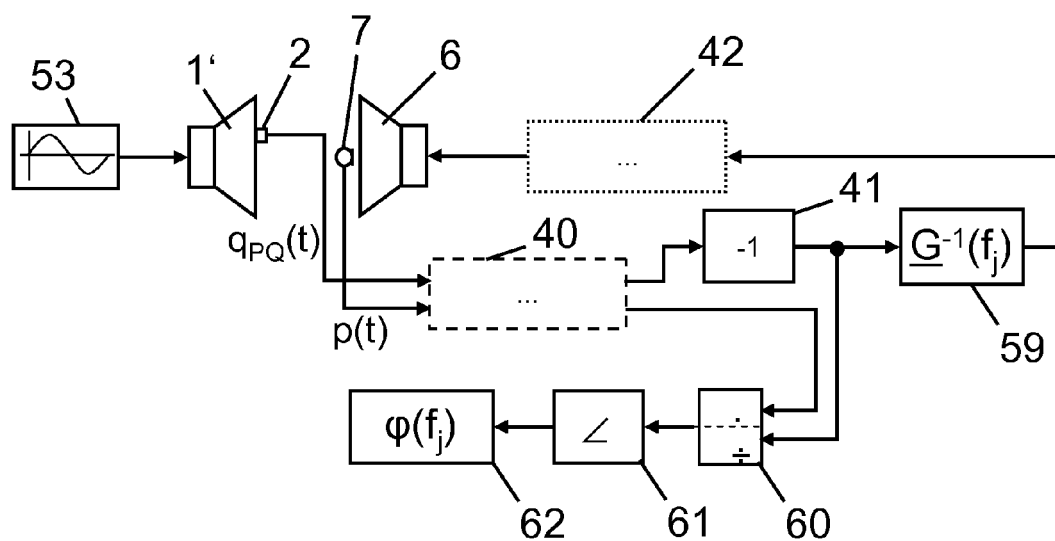


Fig. 4

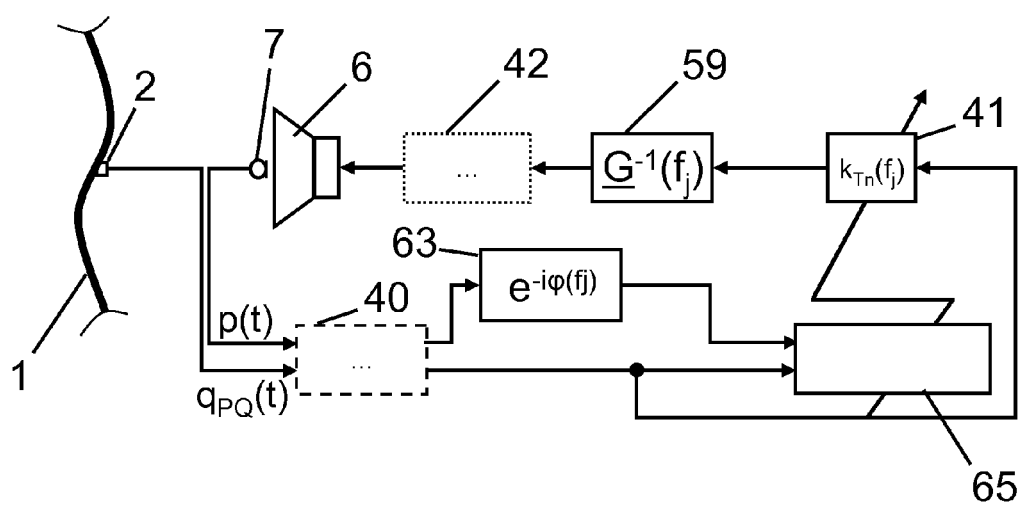


Fig. 5



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 11 16 1701

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	DE 198 32 517 A1 (IBS INGENIEURBUERO FUER SCHALL [DE]; HERMANN WENDT GMBH & CO DAEMMT [D] 27. Januar 2000 (2000-01-27) * Spalte 3, Zeile 6 - Zeile 29 * * Spalte 4, Zeile 33 - Zeile 49 * * Spalte 5, Zeile 35 - Zeile 45 * * Abbildung 1 *	1-15	INV. G10K11/178
A	EP 1 630 788 A1 (AIRBUS GMBH [DE]) 1. März 2006 (2006-03-01) * Absätze [0005], [0006], [0020] - [0022] *	1-15	
A	US 7 317 801 B1 (AMIR NEHEMIA [IL]) 8. Januar 2008 (2008-01-08) * Spalte 4, Zeile 24 - Zeile 43 * * Spalte 4, Zeile 62 - Zeile 67 * * Spalte 5, Zeile 17 - Zeile 28 * * Spalte 6, Zeile 64 - Spalte 7, Zeile 19 * * Spalte 10, Zeile 48 - Spalte 11, Zeile 11; Abbildung 1 *	1-15	
A	US 2003/051479 A1 (HOGLE JOSEPH ALAN [US] ET AL) 20. März 2003 (2003-03-20) * Absätze [0019], [0020]; Abbildung 1 *	1-15	
A	US 5 832 095 A (DANIELS MARK A [US]) 3. November 1998 (1998-11-03) * Spalte 3, Zeile 43 - Spalte 4, Zeile 25; Anspruch 1 *	1-15	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 26. Juli 2011	Prüfer Schneiderbauer, K
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	

 1
EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

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

EP 11 16 1701

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.

26-07-2011

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 19832517 A1	27-01-2000	KEINE	
EP 1630788 A1	01-03-2006	KEINE	
US 7317801 B1	08-01-2008	IL 121555 A	08-07-2008
		US 2011116645 A1	19-05-2011
US 2003051479 A1	20-03-2003	CN 1420261 A	28-05-2003
		EP 1296313 A2	26-03-2003
		MX PA02009170 A	13-12-2004
US 5832095 A	03-11-1998	AU 723757 B2	07-09-2000
		AU 4187797 A	23-04-1998
		BR 9705074 A	30-03-1999
		CN 1180980 A	06-05-1998
		EP 0837452 A2	22-04-1998
		ID 18590 A	23-04-1998
		JP 3375527 B2	10-02-2003
		JP 10149170 A	02-06-1998
		NO 974782 A	11-05-1998
		SG 53091 A1	28-09-1998

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 Nicht-Patentliteratur

- **ELLIOT, S.J. et al.** In Flight Experiments on the Active Control of Propeller-induced Cabin Noise. *Journal of Sound and vibration*, 1990, 219-238 [0005]
- **ELLIOTT, S.J. et al.** Power output minimization and power absorption in the active control of sound. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 2501-2512 [0008]
- **BULLMORE, A.J. et al.** The active minimization of harmonic enclosed sound fields, Part I-III. *Journal of Sound and Vibration*, 1987, 1-58 [0008]
- **TOHYAMA, M. ; SUZUKI, A ; SUGIYAMA, K.** Active Power Minimization of a Sound Source in a Reverberant Closed Space. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 246-248 [0009]
- Active global noise control by sound power. **KANG, S.W. ; KIM, Y.H.** ACTIVE 95: Proceedings of the 1995 International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Newport Beach (U.S.A. Noise Control Foundation, 1995 [0009]