



**Beschreibung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall einer Mehrzahl von primären Schallquellen mittels Schalls einer Mehrzahl von sekundären Schallquellen, wobei jeder sekundären Schallquelle genau eine primäre Schallquelle zugeordnet ist, sowie ein System zur aktiven Unterdrückung von Schall mit einem erfindungsgemäßen Verfahren.

**[0002]** Aktive Schallunterdrückungssysteme und -verfahren, die auch als Gegenschallsysteme bzw. -verfahren oder Lärmreduktionssysteme und -verfahren bezeichnet werden, setzen zur Reduktion des von einer oder mehreren als primäre Schallquelle oder Primärschallquellen bezeichneten Lärmquelle abgestrahlten Primärschalls typischerweise einen oder mehrere Sekundärschallquellen oder sekundäre Schallquellen 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 oder den Primärschallquellen und den Lautsprechern 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 Primärschallquellen und die Sekundärschallquellen derart gegenseitig beeinflussen, dass die von der Kombination aus Primär- und Sekundärschallquellen abgestrahlte gesamte Schalleistung 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 Schalleistungsabstrahlung 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 Schallintensitätssensoren, 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 gleichoder gegenphasig angesteuert wird, bzw. in Bezug auf die Primärquelle gleich- oder gegenphasig schwingt, und die Sekundärquelle keine Wirkschalleistung abstrahlt. Die Wirkschalleistung ist dabei der Realteil der üblicherweise durch eine komplexe Größe dargestellten Gesamtschalleistung und entspricht dem tatsächlichen Nettoenergietransport pro Sekunde senkrecht zu einer Fläche, wie etwa der Abstrahlfläche einer Schallquelle. Demgegenüber ist die durch den Imaginärteil der Gesamtschalleistung dargestellte Blindschalleistung 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]** Aus der EP 2 378 513 A1 sind ein System und ein Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall einer primären Schallquelle mittels einer sekundären Schallquelle bekannt. Grundsätzlich kann das dort beschriebene Verfahren auch zur aktiven Schallunterdrückung von mehreren primären Schallquellen durch mehrere sekundäre Schallquellen verwendet werden, wobei jeder primären Schallquelle genau eine sekundäre Schallquelle zugeordnet wird. Dabei stellt sich allerdings das Problem, dass die Interaktion zwischen den verschiedenen primären und sekundären Schallquellen nicht berücksichtigt wird und es damit nicht zu einer effektiven Minimierung des insgesamt abgestrahlten Schalls kommt.

**[0012]** Weiterhin bedarf das aus der EP 2 378 513 A1 bekannte System einer einmaligen Vorentzerrung zur Anpassung der Beschleunigung oder Schnelle der sekundären Schallquellen. Dabei wird von einer Zeitinvarianz der primären Schallquellen und einer Schallübertragung ohne äußere Störungen ausgegangen. Im Langzeitbetrieb der sekundären Schallquellen kann sich jedoch eine Phasenlage zwischen den Schwingungen der primären Schallquellen und der sekundären Schallquellen, beispielsweise durch eine vibro-akustische Wechselwirkung zwischen den primären und sekundären Schallquellen, ändern.

**[0013]** Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein Verfahren und ein System zur aktiven Unterdrückung von Schall bereitzustellen, mit dem Schall, der von einer Mehrzahl von primären Schallquellen emittiert worden ist, wirksam unterdrückt werden kann. In einem weiteren Aspekt soll die erfindungsgemäße Lösung zudem ohne eine Vorentzerrung bzw. Abstimmung der Sekundärquellen auf die jeweiligen primären Schallquellen auskommen und auch eine zeitliche Veränderung der Phasenlage zwischen primären und sekundären Schallquellen soll berücksichtigt werden.

**[0014]** In einem ersten Aspekt löst die vorliegende Erfindung diese Aufgabe mit einem Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall einer Mehrzahl von primären Schallquellen mittels Schalls einer Mehrzahl von sekundären Schallquellen, wobei jeder sekundären Schallquelle genau eine primäre Schallquelle zugeordnet ist. Zur aktiven Unterdrückung des Schalls der Mehrzahl von primären Schallquellen und zur Reduzierung einer Schallintensität des Schalls der sekundären Schallquellen auf oder gegen null wird für jede sekundäre Schallquelle eine Stellgröße für die Steuerung der sekundären Schallquelle mit den folgenden Schritten iterativ bestimmt: Bestimmen einer Schnelle jeder primären Schallquelle, Bestimmen einer Schnelle und eines Schalldrucks jeder sekundären Schallquelle, Bestimmen einer effektiv zu unterdrückenden Schnelle für jede sekundäre Schallquelle, wobei die effektiv zu unterdrückende Schnelle einer sekun-

dären Schallquelle neben der Schnelle, die für die der betreffenden sekundären Schallquelle zugeordneten primären Schallquelle bestimmt worden ist, auch die für alle sekundären Schallquellen mit Ausnahme der betreffenden sekundären Schallquelle bestimmten Schalldrücke und Schnellen umfasst, und Bestimmen der Stellgröße für jede sekundäre Schallquelle derart, dass eine Differenz aus der für eine sekundäre Schallquelle bestimmten effektiv zu unterdrückenden Schnelle und der für die sekundäre Schallquelle bestimmten Schnelle minimiert wird. Die sekundären Schallquellen werden mit den jeweils bestimmten Stellgrößen gesteuert.

**[0015]** Bei der Mehrzahl von primären Schallquellen kann es sich beispielsweise um verschiedene Schallquellen handeln, die jede gesondert Schall emittieren. Es ist allerdings auch denkbar, dass es sich bei der Mehrzahl von primären Schallquellen um so genannte elementare Schallquellen handelt, in die eine reale Schallquelle gedanklich zerlegt wird, wenn die reale Schallquelle Schall mit unterschiedlichen Phasen und/oder in unterschiedliche Richtungen abstrahlt.

**[0016]** Bei den sekundären Schallquellen kann es sich beispielsweise um Lautsprecher handeln, wobei eine sekundäre Schallquelle auch von einer Mehrzahl von Lautsprechern gebildet sein kann, die alle am gleichen Ort angeordnet sind und von der Datenverarbeitungseinrichtung gleich gesteuert werden. Jeder der sekundären Schallquellen wird genau eine primäre Schallquelle zugeordnet. Die Anzahl der primären Schallquellen, deren Schall aktiv unterdrückt wird, ist somit kleiner oder gleich der Anzahl der sekundären Schallquellen. Einer primären Schallquelle können damit auch mehrere sekundäre Schallquellen zugeordnet werden. Grundsätzlich ist es auch möglich, dass die Anzahl der primären Schallquellen größer ist als die Anzahl der sekundären Schallquellen. Dies setzt allerdings voraus, dass zumindest der von einem Teil der primären Schallquellen abgestrahlte oder erzeugte Schall nicht aktiv unterdrückt wird. Beispielsweise muss eine primäre Schallquelle, die im Verhältnis zu den übrigen primären Schallquellen nicht dominant ist, nicht zwingend unterdrückt werden. Nichtsdestotrotz ist aber jeder primären Schallquelle, deren Schall aktiv unterdrückt werden soll, zumindest eine sekundäre Schallquelle zugeordnet.

**[0017]** Die sekundären Schallquellen werden erfindungsgemäß mit Stellgrößen gesteuert, die iterativ, d.h. in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten, so bestimmt werden, dass der Schall der Mehrzahl von primären Schallquellen aktiv unterdrückt und die Schallintensität des von den sekundären Schallquellen emittierten Schalls minimal, aber nicht negativ wird, d.h. gegen null reduziert wird, und vorzugsweise null ist. Wird die Schallintensität der sekundären Schallquellen negativ, so wird der Schall der primären Schallquellen absorbiert und eine Unterdrückung des Schalls der primären Schallquellen könnte über eine Maximierung der Absorption erreicht werden.

**[0018]** Da im Folgenden sämtliche Berechnungen im Frequenzraum durchgeführt werden, d.h. mit gemessenen Signalen, die aus der Zeitdomäne in die Frequenzdomäne fouriertransformiert worden sind, wird die Abhängigkeit der verschiedenen Größen nicht von der Zeit  $t$  sondern von der Frequenz  $k$  angegeben.

**[0019]** Die Schallintensität  $i_s(k)$  der sekundären Schallquellen kann beispielsweise aus dem Schalldruck  $p_s(k)$  und der Schnelle oder Beschleunigung des Schalls  $a_s(k)$ , wobei der Fettdruck auf einen Vektor  $\mathbf{a}(k) = [a_1(k), a_2(k), \dots, a_n(k), \dots, a_n(k)]$  mit  $n$  Einträgen für  $n$  sekundäre Schallquellen hinweist, gemäß

$$i_s(k) = -\frac{1}{2\omega} \cdot \text{Im}(\text{diag}\{\mathbf{p}_s(k)\}\mathbf{a}_s(k)^*) \quad \text{Gleichung (1)}$$

berechnet werden, wobei der Index  $p$  für die primären Schallquellen und der Index  $s$  für die sekundären Schallquellen steht,  $q^*$  das komplex konjugierte von  $q$  bezeichnet,  $\text{diag}\{v\}$  einen Diagonalmatrix mit den Einträgen des Vektors  $v$  auf der Diagonalen ist,  $\text{Im}$  den Imaginärteil einer komplexen Zahl bezeichnet und  $\omega = 2\pi k$  die Kreisfrequenz ist.

**[0020]** Um die Nullstelle der Schallintensität der Sekundärquellen zu erreichen bzw. sich dieser bei positiven Schallintensitäten möglichst nah anzunähern, wird für jede Schallquelle eine Schnelle oder Schallschnelle bestimmt. Das Bestimmen einer Schallschnelle umfasst nicht notwendiger Weise, dass tatsächlich die eigentliche Schallschnelle bestimmt wird. Je nach Ausgestaltung der Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens kann es auch genügen, wenn lediglich die Schallbeschleunigung bestimmt wird. Somit umfasst der Begriff Schnelle im Sinne der vorliegenden Patentanmeldung nicht nur die eigentliche Schallschnelle, sondern auch direkt mit dieser in Beziehung stehende Größen, wie beispielsweise eine Beschleunigung oder Schallbeschleunigung. Um die Schnelle einer Schallquelle zu bestimmen, kann beispielsweise ein Beschleunigungssensor verwendet werden, der direkt auf der schwingenden Schallquelle, beispielsweise einer Membran eines Lautsprechers, angeordnet ist. Alternativ ist auch möglich, einen Lasersensor zu verwenden, mit dem eine schwingende Bewegung einer Oberfläche einer Schallquelle erfasst wird, wobei aus der erfassten Bewegung eine Beschleunigung oder eine Schnelle des Schalls bestimmt werden kann.

**[0021]** Weiterhin wird für jede sekundäre Schallquelle ein Schalldruck bestimmt. Bei der Bestimmung eines Schalldrucks können beispielsweise Mikrofone verwendet werden, die direkt vor den jeweiligen sekundären Schallquellen angeordnet werden.

**[0022]** Aus den bestimmten Schnellen und Schalldrücken wird eine effektiv zu unterdrückende Schnelle für jede der

sekundären Schallquellen bestimmt. Die effektiv durch eine sekundäre Schallquelle zu unterdrückende Schnelle entspricht in einer bevorzugten Ausführungsform genau der Schnelle, die für die sekundäre Schallquelle bestimmt worden ist. Dies kann beispielsweise wie folgt dargestellt werden:

$$\mathbf{a}_s(k) = \text{diag}\{\boldsymbol{\kappa}(k)\} \mathbf{a}_p(k) \quad \text{Gleichung (2)}$$

wobei  $\text{diag}\{\boldsymbol{\kappa}(k)\} \mathbf{a}_p(k)$  die effektiv zu unterdrückende Schnelle ist. Dabei ist  $\text{diag}\{\boldsymbol{\kappa}(k)\}$  eine Diagonalmatrix mit reellwertigen Faktoren  $\boldsymbol{\kappa}(k) = [\kappa_1(k), \kappa_2(k), \dots, \kappa_n(k)]$  auf der Diagonalen, wobei die Anzahl der reellwertigen Faktoren der Anzahl der sekundären Schallquellen entspricht. Der Vektor  $\mathbf{a}_p(k)$  umfasst die Schnellen oder Beschleunigungen, die für die primären Schallquellen bestimmt worden sind. Der  $i$ -te Eintrag des Vektors  $\mathbf{a}_p(k)$  ist die Schnelle oder Beschleunigung, die für die primäre Schallquelle bestimmt worden ist, die der  $i$ -ten sekundären Schallquelle zugeordnet worden ist. Somit enthält  $\mathbf{a}_p(k)$  die für eine primäre Schallquelle bestimmte Schnelle oder Beschleunigung mehrfach, wenn die primäre Schallquelle mehreren sekundären Schallquellen zugeordnet ist. Die Bestimmung der effektiv zu unterdrückenden Schnelle, genauer gesagt der reellwertigen Faktoren  $\boldsymbol{\kappa}(k)$ , wird nachfolgend beispielhaft in Form von bevorzugten Ausführungsformen näher erläutert.

**[0023]** Die effektiv zu unterdrückende Schnelle einer sekundären Schallquelle umfasst erfindungsgemäß neben der Schnelle, die von der primären Schallquelle erzeugt worden ist, die der betreffenden sekundären Schallquelle zugeordnet ist, noch weitere Beiträge, die von den übrigen sekundären Schallquellen erzeugt werden. Mit anderen Worten umfasst die effektiv durch eine sekundäre Schallquelle zu unterdrückende Schnelle die Schnelle der primären Schallquelle, die der betreffenden sekundären Schallquelle zugeordnet ist, und Beiträge aller anderen sekundären Schallquellen, die aus den für alle anderen sekundären Schallquellen bestimmten Schnellen und Schalldrücken bestimmt werden können. Damit kann auf vorteilhafte Weise auch die Wechselwirkung der verschiedenen sekundären Schallquellen miteinander berücksichtigt werden, so dass tatsächlich eine möglichst vollständige aktive Unterdrückung des Schalls einer Mehrzahl von primären Schallquellen ermöglicht wird.

**[0024]** Anfänglich wurde zur Bestimmung der effektiv zu unterdrückenden Schnelle angenommen, dass die effektiv zu unterdrückende Schnelle einer sekundären Schallquelle und die für die sekundäre Schallquelle bestimmte Schnelle gleich sind. Tatsächlich weichen allerdings die bestimmten Schnellen der sekundären Schallquellen und die effektiv zu unterdrückenden Schnellen voneinander ab. Um die Differenz oder Abweichung

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{a}_s^m(k) - \text{diag}\{\boldsymbol{\kappa}(k)\} \mathbf{a}_p^m(k) \quad \text{Gleichung (3)}$$

zu minimieren, wird daher in einem weiteren Schritt eine neue Stellgröße für jede sekundäre Quelle oder Schallquelle bestimmt. Dabei kennzeichnet der obere Index  $m$  einen gemessenen oder bestimmten Wert. Um die Schallintensität der sekundären Schallquellen gegen oder auf null zu reduzieren, wird erfindungsgemäß dabei die Stellgröße so gewählt, dass der Unterschied bzw. die Differenz zwischen den effektiv zu unterdrückenden Schnellen und den für die sekundären Schallquellen bestimmten Schnellen kleiner oder minimiert wird. Dabei umfasst die Minimierung einer Differenz nicht nur ein Auffinden eines absoluten Minimums der Differenz, das in der Praxis kaum oder zumindest nur schwer zu erreichen ist, sondern bereits ein Auffinden eines relativen Minimums einer Differenz, d.h. eine Verkleinerung gegenüber einer anderen Differenz. Die Minimierung kann beispielsweise mit einem aus dem Stand der Technik bekannten Optimierungsverfahren erfolgen. Ein mögliches, erfindungsgemäßes Verfahren zur Minimierung der Differenz wird nachfolgend als bevorzugte Ausführungsform der Erfindung näher erläutert.

**[0025]** Erfindungsgemäß werden die sekundären Schallquellen mit den auf diese Weise bestimmten Stellgrößen angesteuert. Durch die Steuerung der sekundären Schallquellen mit der neu bestimmten Stellgröße wird auf vorteilhafte Weise die Differenz zwischen der Schnelle der sekundären Schallquellen und der effektiv zu unterdrückenden Schnelle geringer und damit der von den primären Schallquellen abgestrahlte Schall unterdrückt. Gleichzeitig wird auch die Schallintensität der sekundären Schallquellen gegen oder auf null reduziert. Damit wird auf vorteilhafte Weise der Schall der primären Schallquellen aktiv unterdrückt und gleichzeitig vermieden, dass die sekundären Schallquellen selbst neuen Lärm erzeugen. Zusätzlich wird dabei durch die Berechnung einer effektiv durch die jeweiligen sekundären Schallquellen zu unterdrückenden Schnelle unter Berücksichtigung der übrigen sekundären Schallquellen die Wechselwirkung der Schallquellen untereinander berücksichtigt.

**[0026]** In einer bevorzugten Ausführungsform werden die effektiv zu unterdrückenden Schnellen unter der Annahme bestimmt, dass die Schallintensität jeder sekundären Schallquelle null ist. Diese Annahme hat sich als besonders vorteilhaft erwiesen, um Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen sekundären Schallquellen zu berücksichtigen

und gleichzeitig die insgesamt abgestrahlte Schallenergie gegen null zu minimieren. Damit wird ein insgesamt weniger lautes Verfahren geschaffen.

**[0027]** Weiterhin ist bevorzugt, dass zur Bestimmung der effektiv zu unterdrückenden Schnellen eine Übertragungsstreckenmatrix verwendet wird, wobei mit der Übertragungsstreckenmatrix aus einer für eine sekundäre Schallquelle bestimmten Schnelle ein Anteil der einen sekundären Schallquelle an den für die sekundären Schallquellen bestimmten Schalldrücken bestimmt werden kann.

**[0028]** Die erfindungsgemäße Verwendung einer Übertragungsstreckenmatrix ermöglicht die Berechnung des Schalldrucks der sekundären Schallquellen aus den für die sekundären Schallquellen bestimmten Schnellen. Die Übertragungsstreckenmatrix  $H_{pa}(k)$  berücksichtigt, dass Schnelle und Schalldruck der sekundären Schallquelle nicht am gleichen Ort gemessen werden. Beispielsweise wird die Schnelle einer sekundären Schallquelle direkt auf einer Membran eines Lautsprechers, beispielsweise mittels eines Lasersensors oder einer Hallsonde, gemessen, während der Schalldruck mittels eines Mikrofons gemessen wird, das beabstandet zu der Membran angeordnet ist. Die Übertragungsstreckenmatrix ist damit eine empirische Größe, die ein System aus sekundären Schallquellen und Messeinrichtungen beschreibt und die - einmal gemessen - in einer Vorrichtung zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens permanent hinterlegt werden kann.

**[0029]** Mittels der Übertragungsstreckenmatrix lässt sich das Problem lösen, dass am Ort der Messung bzw. Bestimmung des Schalldrucks der sekundären Schallquellen Einflüsse sämtlicher primärer und sekundärer Schallquellen auf den Sensor einwirken. Im Gegensatz zur Messung der Schnelle, die sich direkt an der Schallquelle durchführen lässt und die somit frei von Anteilen anderer Schallquellen sein sollte, umfasst die Messung des Schalldrucks auch stets Anteile anderer Schallquellen. Erfindungsgemäß wird die Übertragungsstreckenmatrix verwendet, um von einem für eine sekundäre Schallquelle bestimmten Schalldruck den Anteil abzuziehen, der auf die sekundären Schallquellen zurückzuführen ist, um den Anteil des Schalldrucks zu erhalten, der von den primären Schallquellen erzeugt wird. Der Anteil des primären Schalldrucks  $p_{ps}(k)$ , also der von den primären Schallquellen am Messort erzeugte Schalldruck, kann beispielsweise gemäß

$$p_{ps}(k) = p_s(k) - H_{pa}(k)a_s(k) \quad \text{Gleichung (4)}$$

bestimmt werden, wobei  $p_s(k)$  der bestimmte sekundäre Schalldruck ist. Eine gemessene und nicht nur am theoretischen Modell bestimmte Übertragungsstreckenmatrix wird im Folgenden mit  $\hat{H}_{pa}^m$

bezeichnet wird. Der am Messort von den primären Schallquellen erzeugte Schalldruck  $p_{ps}^m(k)$  ergibt sich auf Grundlage der mit realen Sensoren gemessenen oder bestimmten Größen aus

$$p_{ps}^m(k) = p_s^m(k) - \hat{H}_{pa}^m(k)a_s^m(k) . \quad \text{Gleichung (5)}$$

**[0030]** In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die Übertragungsstreckenmatrix für jede sekundäre Schallquelle einen Faktor zur Korrektur eines Phasenunterschieds zwischen dem für eine sekundäre Schallquelle bestimmten Schalldruck und der für die betreffende sekundäre Schallquelle bestimmten Schnelle. Mit dem erfindungsgemäßen Faktor lässt sich auf vorteilhafte Weise beispielsweise ein Laufzeitunterschied von einer Schallquelle zu den unterschiedlichen Sensoren, Phasenunterschiede aufgrund abweichender Güte der Sensoren oder Phasenunterschiede aufgrund unterschiedlicher Messverfahren bei der Bestimmung eines Schalldrucks und einer Schnelle kompensieren. Die Verwendung eines Faktors zur Korrektur eines Phasenunterschieds hat sich insbesondere in der praktischen Umsetzung des Verfahrens als vorteilhaft erwiesen, um den von der primären Schallquelle erzeugten Schall wirksam aktiv zu unterdrücken.

**[0031]** Beispielsweise kann eine gemessene Übertragungsstreckenmatrix  $\hat{H}_{pa}^m$ , in der die Phasenunterschiede nicht behoben sind, gemäß

$$\hat{\mathbf{H}}_{pa}(k) = \text{diag}\{e^{-j\varphi_1(k)}, e^{-j\varphi_2(k)}, \dots, e^{-j\varphi_n(k)}\} \hat{\mathbf{H}}_{pa}^m(k) \quad \text{Gleichung (6a)}$$

5 **[0032]** in eine Übertragungsmatrix  $\hat{\mathbf{H}}_{pa}(k)$  überführt werden, in der die Phasenunterschiede berücksichtigt werden, wobei  $j$  die imaginäre Einheit und  $\varphi$  ein frequenzabhängiger Phasenunterschied ist. Entsprechend kann auch der Anteil am gemessenen Schalldruck aufgrund der primären Schallquellen in einen Schalldruck der Form

$$10 \quad \hat{\mathbf{p}}_{ps}(k) = \text{diag}\{e^{-j\varphi_1(k)}, e^{-j\varphi_2(k)}, \dots, e^{-j\varphi_n(k)}\} \mathbf{p}_{ps}^m(k) \quad \text{Gleichung (6b)}$$

überführt werden, welcher die Phasenunterschiede zwischen den verschiedenen Sensoren berücksichtigt.

15 **[0033]** In einer beispielhaften, bevorzugten Ausführungsform werden zur Erfassung der Schnellen der primären und der sekundären Schallquellen Beschleunigungssensoren mit gleichem Messprinzip verwendet. Daher ist es nicht notwendig, bei den bestimmten Schnellen einen Phasenunterschied auszugleichen, da zwischen den Sensoren kein Phasenunterschied auftritt. Somit kann in der beispielhaften Ausführungsform

$$20 \quad \mathbf{a}_p^m(k) = \mathbf{a}_p(k) \quad \text{und} \quad \mathbf{a}_s^m(k) = \mathbf{a}_s(k) \quad \text{Gleichung (6c)}$$

25 **[0034]** gesetzt werden. Sollten allerdings bei der Bestimmung der Schnellen der primären und der sekundären Schallquellen Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien verwendet werden, so wäre eine Phasenkorrektur entsprechend zu Gleichung (6b) notwendig.

**[0035]** Unter Verwendung der oben aufgeführten Gleichungen 1, 2, 5 und 6a-c lässt sich der zur Bestimmung der effektiv zu unterdrückenden Schnelle verwendete Faktor  $\kappa$  in einer beispielhaften Ausführungsform gemäß

$$30 \quad \kappa_{sol}^c(k) = \frac{-\text{Im}[\text{diag}\{\mathbf{a}_p^m(k)^*\} \hat{\mathbf{H}}_{pa}(k) \text{diag}\{\mathbf{a}_p^m(k)\}]^{-1}}{\text{Im}[\text{diag}\{\hat{\mathbf{p}}_{ps}(k)\} \mathbf{a}_p^m(k)^*]} \quad \text{Gleichung (7)}$$

35 berechnen, wobei der Index sol die Lösung eines Gleichungssystems bezeichnet und der obere Index c die Korrektur um den Phasenfehler kennzeichnet. Dabei ist allerdings zu beachten, dass Gleichung 7 nur zu einer eindeutigen Lösung für  $\kappa(k)$  führt, wenn - wie in einer bevorzugten Ausführungsform - die Anzahl der sekundären Schallquellen gleich der Anzahl der primären Schallquellen ist. Sind mehrere sekundäre Schallquellen hingegen einer primären Schallquelle zugeordnet, so ist das Gleichungssystem (7) überbestimmt, sofern sich die sekundären Quellen, welche genau einer primären Quelle zugeordnet sind, am selben Ort befinden und eine Lösung für den Faktor  $\kappa(k)$  kann beispielsweise über ein Optimierungsverfahren gefunden werden. Lösungsmöglichkeiten für überbestimmte Gleichungssysteme sind dem Fachmann aus dem Stand der Technik hinlänglich bekannt.

45 **[0036]** Sind die sekundären Quellen, die einer primären Schallquelle zugeordnet sind, nicht am selben Ort, so ergeben sich in der Übertragungsmatrix  $\hat{\mathbf{H}}_{pa}(k)$  andere Einträge bei den sekundären Schalldrücken am Ort der sekundären Schallquellen und auch im Vektor der primären Schalldrücke  $\hat{\mathbf{p}}_{ps}(k)$  sind die Werte an den Orten der sekundären Schallquellen, welche genau einer primären Schallquelle zugeordnet sind, verschieden. Somit sind die Koeffizienten im Gleichungssystem und die rechten Seiten verschieden. Es ergibt sich somit wieder eine eindeutige Lösung.

50 **[0037]** Es ist weiterhin bevorzugt, zur iterativen Bestimmung der Stellgrößen einen Filtered-Reference-Least-Mean-Square Algorithmus zu verwenden. Vorzugsweise wird als eine Referenz in dem Filtered-Reference-Least-Mean-Square Algorithmus eine Abbildung einer für eine der primären Schallquellen bestimmten Schnelle verwendet. Die Abbildung erfolgt mittels einer Stellgrößenübertragungsmatrix, mit der bestimmt werden kann, welche Schnellen von den sekundären Schallquellen in Abhängigkeit der Stellgrößen erzeugt werden.

55 **[0038]** Filtered-Reference-Least-Mean-Square (FxLMS) Algorithmen sind dem Fachmann aus dem Stand der Technik hinlänglich bekannt. Sie ermöglichen eine einfache und gleichzeitig robuste Minimierung einer Fehlergröße, hier der Differenz  $e(k)$  zwischen der effektiv zu unterdrückenden Schnelle und der für die sekundären Quellen bestimmten Schnelle gemäß Gleichung (3). Beispielsweise kann die Stellgröße  $\mathbf{w}_{u+1}(k)$  gemäß

$$\mathbf{w}_{u+1}(k) = \mathbf{w}_u(k) - \mu(k)X(k)^* \left( \hat{\mathbf{H}}_a^m(k) \right)^H \mathbf{e}(k) \quad \text{Gleichung (8)}$$

5

bestimmt werden, wobei  $\mathbf{w}_u$  die im vorausgehenden Schritt  $u$  bestimmte Stellgröße ist,  $\mu(k)$  ein Gewicht ist, mit dem die Konvergenzgeschwindigkeit des Filters eingestellt werden kann,  $X(k)$  eine Referenz, beispielsweise eine Schnelle einer der Primärquellen, ist, der hochgestellte Index  $H$  eine adjungierte, d.h. komplex konjugierte und transponierte, Matrix

10 bezeichnet und  $\hat{\mathbf{H}}_a^m$  die Stellgrößenübertragungsmatrix bezeichnet.

**[0039]** In einer bevorzugten Ausführungsform ist jeder primären Schallquelle genau eine sekundäre Schallquelle zugeordnet. Diese bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist besonders wirtschaftlich, da die Anzahl der benötigten sekundären Schallquellen und Sensoren minimal ist.

15 **[0040]** In einem weiteren Aspekt wird die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe durch ein System zur aktiven Unterdrückung von Schall mit einem Verfahren gemäß einer der vorausgehenden Ausführungsformen gelöst. Das System umfasst eine Mehrzahl von Schalldrucksensoren, eine Mehrzahl von primären Schnellesensoren, eine Mehrzahl von sekundären Schnellesensoren, eine Mehrzahl von sekundären Schallquellen und eine Datenverarbeitungseinrichtung. Die Schalldrucksensoren, die Schnellesensoren und die sekundären Schallquellen sind funktionell mit der Datenverarbeitungseinrichtung verbunden. Das System ist dazu eingerichtet, die Schnelle der primären Schallquellen mittels der primären Schnellesensoren zu bestimmen. Das System ist weiterhin dazu eingerichtet, den Schalldruck der sekundären Schallquellen mittels der Schalldrucksensoren zu bestimmen. Weiterhin ist das System dazu eingerichtet, die Schnelle der sekundären Schallquellen mittels der sekundären Schnellesensoren zu bestimmen. Die Datenverarbeitungseinrichtung ist dazu eingerichtet, aus den bestimmten Schnellen und Schalldrücken Stellgrößen für die sekundären Schallquellen mit einem Verfahren gemäß einer der vorausgehenden bevorzugten Ausführungsformen zu bestimmen und die sekundären Schallquellen mit den bestimmten Stellgrößen zu steuern.

25 **[0041]** Das erfindungsgemäße System umfasst die zur Durchführung des erfinderischen Verfahrens notwendigen Mittel. Soweit das System dazu eingerichtet ist, beispielsweise eine Schnelle oder einen Schalldruck zu bestimmen, so kann der Schritt des Bestimmens bereits direkt von den Sensoren durchgeführt werden, die eine Größe messen, auf deren Grundlage der jeweilige Wert bestimmt wird. Es ist aber auch denkbar, dass die Sensoren nur einen Messwert an einer Datenverarbeitungseinrichtung senden, der in dieser zur Bestimmung des benötigten Wertes bzw. der benötigten Größe ausgewertet wird. Bei der Datenverarbeitungseinrichtung kann es sich beispielsweise um einen herkömmlichen Computer oder um einen integrierten Schaltkreis handeln. Eine Datenverarbeitungseinrichtung kann zur Durchführung von Verfahrensschritten beispielsweise durch Aufspielen von Software aber auch durch entsprechende hardwareseitige Maßnahmen eingerichtet werden. Auch kann die Datenverarbeitungseinrichtung von mehreren getrennten Datenverarbeitungseinrichtungen gebildet werden.

35 **[0042]** Die Vorteile des erfindungsgemäßen Systems entsprechen den Vorteilen, die sich für die mit dem System ausgeführten Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben und bereits in den vorausgehenden Abschnitten dargestellt worden sind.

40 **[0043]** In einer bevorzugten Ausführungsform ist einer der Schnellesensoren ein Lasersensor. Lasersensoren ermöglichen eine im Wesentlichen verzögerungsfreie Messung der Beschleunigung einer Schallquelle und damit der Schnelle des von der Schallquelle erzeugten Schalls, ohne dass hierzu ein Sensor direkt an der Schallquelle angebracht werden müsste. Insbesondere kann ein Lasersensor zur Messung einer Schnelle einer primären Schallquelle in einem Gehäuse eines erfindungsgemäßen Systems angeordnet sein und aus einem Abstand zu der primären Schallquelle die Beschleunigung messen. Damit werden Modifikationen an der primären Schallquelle zur Anbringung von Sensoren überflüssig.

45 **[0044]** Besonders bevorzugt ist es, zumindest einen primären und einen sekundären Schnellesensor aus einem Lasersensor zu bilden, wobei der eine Lasersensor sowohl zur Bestimmung einer Schnelle einer primären Schallquelle als auch zur Bestimmung einer Schnelle der sekundären Schallquelle, der die betreffende primäre Schallquelle zugeordnet worden ist, verwendet werden kann. Mit anderen Worten wird in der bevorzugten Ausführungsform der gleiche Lasersensor verwendet, um eine Schnelle einer primären Schallquelle und einer sekundären Schallquelle zu bestimmen. So ist sichergestellt, dass das gleiche Messverfahren zur Bestimmung der Schnellen von sekundären und primären Schallquellen verwendet wird und keine Phasenunterschiede zwischen Messverfahren ausgeglichen werden müssen. Damit gestaltet sich die Durchführung des Berechnungsverfahrens einfacher. Weiterhin kann auf einen zusätzlichen Schnellesensor verzichtet werden, was die Kosten eines erfindungsgemäßen Systems senkt.

50 **[0045]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist zumindest einer der Schnellesensoren eine Hallsonde. Eine Hallsonde ist eine besonders kostengünstige Ausführungsform eines Beschleunigungssensors, der zur Bestimmung einer Schnelle einer Schallquelle verwendet werden kann.

55 **[0046]** Es ist weiterhin bevorzugt, dass zumindest einer der Schalldrucksensoren ein Mikrofon ist. Weiter ist bevorzugt,

dass in einem Speicher der Datenverarbeitungseinrichtung die Übertragungstreckenmatrix und/oder die Stellgrößenübertragungsmatrix permanent gespeichert sind. So kann bei einer permanenten Anordnung des Systems dieses jederzeit betrieben werden, ohne dass vorherige Messungen zur Justierung des Systems notwendig sind. Schließlich ist bevorzugt, wenn eine Anzahl der Schalldrucksensoren, der primären Schnellesensoren, der sekundären Schnellesensoren und der sekundären Schallquellen gleich ist.

**[0047]** Sofern nicht ausdrücklich in der Beschreibung der verschiedenen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Systems von Ausführungen abgewichen worden ist, die in Bezug auf das erfindungsgemäße Verfahren bereits in den vorausgehenden Absätzen gemacht worden sind, so sind die dort dargestellten Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens und der Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens auf die verschiedenen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Systems anwendbar.

**[0048]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen auf Grundlage der Zeichnungen weiter erläutert. Die Zeichnungen zeigen in

Fig. 1 schematisch den prinzipiellen Aufbau eines erfindungsgemäßen Systems zur aktiven Unterdrückung von Schall,

Fig. 2 ein Flussdiagramm einer bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens und

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Ausführungsform einer sekundären Schallquelle.

**[0049]** Figur 1 zeigt ein erfindungsgemäßes System 1 zur aktiven Unterdrückung von Schall einer Mehrzahl von primären Schallquellen 3. Das System 1 umfasst zwei sekundäre Schallquellen 5 in Form von Lautsprechern, zwei primäre Schnellesensoren 7 in Form von Hallsonden, zwei sekundäre Schnellesensoren 9 ebenfalls in Form von Hallsonden, zwei Schalldrucksensoren 11 in Form von Mikrofonen und eine Datenverarbeitungseinrichtung 13. Jeder sekundären Schallquelle 5 ist genau eine primäre Schallquelle 3 zugeordnete, wobei in dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel auch jeder primären Schallquelle 3 genau eine sekundäre Schallquelle 5 zugeordnet ist. Grundsätzlich ist es allerdings auch denkbar, dass jeder primären Schallquelle 3 mehr als eine sekundäre Schallquelle 5 zugeordnet ist.

**[0050]** Die verschiedenen Sensoren 7, 9, 11 sind funktionell mit der Datenverarbeitungseinrichtung 13 verbunden. Ebenfalls mit der Datenverarbeitungseinrichtung 13 sind die sekundären Schallquellen 5 funktionell verbunden und zwar derart, dass die Datenverarbeitungseinrichtung 13 die sekundären Schallquellen 5 mittels Stellgrößen steuern kann. Wie man der Darstellung in Fig. 1 entnehmen kann, sind die sekundären Schnellesensoren 9 direkt auf einer Membran 15 der sekundären Schallquellen 5 angeordnet. Somit kann damit verzögerungsfrei und ungestört von Einflüssen anderer Schallquellen direkt die Beschleunigung der sekundären Schallquellen 5 gemessen und daraus die Schnelle bestimmt oder als Schnelle im weiteren Verfahren verwendet werden.

**[0051]** Ebenfalls dargestellt in Fig. 1 ist eine reale Schallquelle 17, die Schall emittiert, der von dem System 1 aktiv unterdrückt werden soll. Die Schallerzeugung durch die reale Schallquelle 17 ist durch die schwingende Oberfläche der Schallquelle 17 angedeutet. Diese reale Schallquelle 17 erzeugt Schall mit zwei verschiedenen Phasengängen. Daher wird die reale Schallquelle 17 gedanklich, wie durch den Pfeil 19 angedeutet, in zwei elementare primäre Schallquellen 3 zerlegt, von denen jede für sich konstant in einer Phase schwingt. Die beiden primären Schallquellen 3 emittieren im Vergleich zueinander allerdings Schall mit verschiedenen Phasengängen. Somit sind die primären Schnellesensoren 7 auch tatsächlich gar nicht direkt auf einer Oberfläche einer der beiden primären Schallquellen 3, sondern auf der Oberfläche der realen Schallquelle 17 angeordnet. Im Folgenden wird jedoch zur Vereinfachung der Darstellung lediglich auf die getrennten primären Schallquellen 3 Bezug genommen.

**[0052]** Auch wenn das in Fig. 1 dargestellte Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Systems 1 auf zwei primäre Schallquellen 3 beschränkt ist, so ist es offensichtlich, dass das System auf eine größere Anzahl von primären Schallquellen 3 unter Verwendung von entsprechender Anzahl von Sensoren 7, 9, 11 und sekundären Schallquellen 5 ausgedehnt werden kann. Auch ist es möglich, mehrere sekundäre Schallquellen 5 zur Unterdrückung des Schalls einer primären Schallquelle 3 zu verwenden.

**[0053]** In Fig. 3 ist ein alternativer Aufbau einer sekundären Schallquelle 21 dargestellt, die ebenfalls in dem System 1 gemäß Fig. 1 eingesetzt werden kann. Die sekundäre Schallquelle 21 umfasst in einem einzigen Gehäuse 23 einen Schalldrucksensor 11 in Form eines Mikrofons sowie einen kombinierten primären und sekundären Schnellesensor 25 in Form eines Lasersensors, mit dem sowohl eine Schnelle oder Beschleunigung der sekundären Schallquelle 21, d.h. eine Bewegung der Membran 15 der sekundären Schallquelle 21, als auch eine Schnelle einer primären Schallquelle 3 gemessen werden kann. In Fig. 3 ist in dem Gehäuse 23 der sekundären Schallquelle 21 auch eine Datenverarbeitungseinrichtung 13 mit angeordnet. So erhält man eine besonders kompakte Vorrichtung, bei der auf vorteilhafte Weise die Schnelle der primären und der sekundären Schallquelle 3, 21 berührungslos und mit dem gleichen Sensor 25 gemessen werden kann. Dies spart den Aufwand für einen zusätzlichen Sensor. Darüber hinaus ist sichergestellt, dass die Schnellen der primären Schallquelle 3 und der sekundären Schallquelle 21 mit der gleichen Verzögerung gemessen

werden. Auch ist es bei einem berührungslosen Messen der Schnelle der primären Schallquelle 3 nicht notwendig, auf der Oberfläche dieser Schallquelle 3 Sensoren anzuordnen. Damit kann das erfindungsgemäße System 1 unter Verwendung der in Fig. 3 dargestellten sekundären Schallquellen 21 besonders flexibel eingesetzt werden. Um eine übersichtliche Darstellung zu ermöglichen, ist in Fig. 3 auf die Darstellung von funktionellen Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen verzichtet worden.

**[0054]** Auch eine Kombination der in den Figuren 1 und 3 dargestellten Ausführungsformen der erfindungsgemäßen sekundären Schallquellen 5, 21 ist möglich. Insbesondere kann beispielsweise zur Messung der Schnelle der primären Schallquelle 3 ein Lasersensor verwendet werden, während bei der Bestimmung der Schnelle der sekundären Schallquelle 5, 21 eine Hallsonde Verwendung findet.

**[0055]** Nachfolgend wird bezugnehmend auf Fig. 2 ein erfindungsgemäßes Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall einer Mehrzahl von primären Schallquellen mittels Schalls einer Mehrzahl von sekundären Schallquellen beschrieben, wie es beispielsweise mit einem erfindungsgemäßen System 1 durchgeführt werden könnte. Allerdings kann das erfindungsgemäße Verfahren gemäß Fig. 2 auch mit anderen Vorrichtungen durchgeführt werden, sofern sie denn die für die Durchführung des Verfahrens notwendigen Mittel bereitstellen.

**[0056]** Das in Fig. 2 dargestellte Verfahren benötigt drei verschiedene Eingangsgrößen: eine Schnelle  $\mathbf{a}_p^m(t)$  einer Mehrzahl von primären Schallquellen 3, eine Schnelle  $\mathbf{a}_s^m(t)$  einer Mehrzahl von sekundären Schallquellen 5, 21 sowie einen Schalldruck  $\mathbf{p}_s^m(t)$  einer Mehrzahl von sekundären Schallquellen 5, 21. Die Eingangsgrößen sind zuvor aus den mit den jeweiligen Sensoren 7, 9, 11, 25 gemessenen Signalen bestimmt worden. Sämtliche Eingangsgrößen werden vor Durchführung der weiteren Verfahrensschritte in den Frequenzraum fouriertransformiert, wie durch die mit dem Bezugszeichen 27 gekennzeichneten Symbole angedeutet wird. In dem in Fig. 1 dargestellten System 1 entspricht die Anzahl der primären Schallquellen 3 der Anzahl der sekundären Schallquellen 5, 21. Werden hingegen mehr sekundäre Schallquellen 5, 21 als primäre Schallquellen 3 verwendet, so ist zu beachten, dass der  $i$ -te Eintrag des Vektors  $\mathbf{a}_p^m(t)$  die Schnelle ist, die für die primäre Schallquelle 3 bestimmt worden ist, die der sekundären Schallquelle 5, 21 zugeordnet worden ist, deren Schnelle den  $i$ -ten Eintrag im Vektor  $\mathbf{a}_s^m(t)$  bildet.

**[0057]** Zunächst wird in einem Additionsschritt 29 der Anteil  $\hat{\mathbf{p}}_{ps}(k)$  des an den jeweiligen Schalldrucksensoren 11 gemessenen Schalldrucks  $\mathbf{p}_s^m(k)$  bestimmt, der dort von den primären Schallquellen 3 erzeugt wird. Hierzu wird von dem bestimmten sekundären Schalldruck  $\mathbf{p}_s^m(k)$  gemäß Gleichung (5) der Anteil  $\hat{\mathbf{H}}_{pa}^m(k)\mathbf{a}_s^m(k)$  der sekundären Schallquellen 5, 21 abgezogen. Der Anteil  $\hat{\mathbf{H}}_{pa}^m(k)\mathbf{a}_s^m(k)$  der sekundären Schallquellen 5, 21 wird durch Abbildung der bestimmten Schnelle oder Beschleunigung  $\mathbf{a}_s^m(k)$  der sekundären Schallquellen 5, 21 mittels einer vor Verwendung des Systems 1 bestimmten Übertragungstreckenmatrix  $\hat{\mathbf{H}}_{pa}^m(k)$  ermittelt. Die Übertragungstreckenmatrix  $\hat{\mathbf{H}}_{pa}^m(k)$  ist vorzugsweise dauerhaft in einem Speicher der Datenverarbeitungseinrichtung 13 abgelegt.

**[0058]** Der so bestimmte Anteil  $\hat{\mathbf{p}}_{ps}(k)$  wird gemeinsam mit den für die primären Schallquellen 3 bestimmten Schnellen  $\mathbf{a}_p^m(k)$ , der Übertragungstreckenmatrix  $\hat{\mathbf{H}}_{pa}^m(k)$  sowie einem Vektor  $\varphi_e(k) =$

**[0059]**  $[e^{-j\varphi_1(k)}, e^{-j\varphi_2(k)}, \dots, e^{-j\varphi_n(k)}]$  von Faktoren zur Kompensierung eines Phasenunterschieds bei der Messung der Schnellen und der Schalldrücke einem Berechnungsschritt 31 zugeführt, in dem gemäß Gleichung (7) der Faktor  $\text{diag}\{\boldsymbol{\kappa}_{sol}^c(k)\}$  bestimmt wird. Der Vektor  $\varphi_e(k)$  wird ebenfalls einmal vor Verwendung des Systems 1 bestimmt und dann dauerhaft im Speicher der Datenverarbeitungseinrichtung 13 abgelegt.

**[0060]** Nachfolgend werden aus dem Faktor  $\text{diag}\{\boldsymbol{\kappa}_{sol}^c(k)\}$  und den für die primären Schallquellen 3 bestimmten Schnellen  $\mathbf{a}_p^m(k)$  in einem Multiplikationsschritt 33 die effektiv zu unterdrückenden Schnellen  $\text{diag}\{\boldsymbol{\kappa}_{sol}^c(k)\}\mathbf{a}_p^m(k)$  berechnet. Die effektiv zu unterdrückenden Schnellen werden in einem weiteren Additions-

schritt 35 von für die sekundären Schallquellen 5, 21 bestimmten Schnellen  $\mathbf{a}_s^m(k)$  abgezogen, um das zur Minimierung vorgesehene Fehlersignal  $\mathbf{e}(k)$  gemäß Gleichung (3) zu bestimmen. Dieses Signal dient als Eingangsgröße für einen Minimierungsschritt 37 mit einem FxLMS Algorithmus.

**[0061]** Als weitere Eingangsgrößen für den Minimierungsschritt 37 werden ein Gewicht  $\mu(k)$ , das in Fig. 2 nicht dargestellt ist, und ein gefilterter Referenzwert verwendet. Zur Bestimmung des gefilterten Referenzwerts wird zunächst in

einem Auswahlsschritt 39 eine Schnelle aus den für die primären Schallquellen bestimmten Schnellen  $\mathbf{a}_p^m(k)$  als

Referenzwert  $X(k)$  ausgewählt, die für die primären Schallquellen bestimmt worden sind. Von dem Referenzwert wird in einem ersten Schritt 41 die komplex Konjugierte gebildet. Der komplex konjugierte Referenzwert wird in einem Ab-

bildungsschritt 43 mittels einer adjungierten Stellgrößenübertragungsmatrix  $(\hat{\mathbf{H}}_a^m(k))^H$ , die den Zusammenhang

zwischen den Stellgrößen und den von den sekundären Quellen 5, 21 erzeugten Schnellen beschreibt, abgebildet. Das Ergebnis der Abbildung ist der gefilterte Referenzwert, der die weitere Eingangsgröße für den Minimierungsschritt 37 ist.

**[0062]** Unter Verwendung der beschriebenen Eingangsgrößen wird im Minimierungsschritt 37 mittels Gleichung (8) aus einer aktuellen Stellgröße  $\mathbf{w}_u(k)$  eine nächste Stellgröße  $\mathbf{w}_{u+1}(k)$  berechnet. Die so bestimmte Stellgröße  $\mathbf{w}_{u+1}(k)$  verringert den Wert des Fehlersignals  $\mathbf{e}(k)$  unter Berücksichtigung einer insgesamt Reduzierung der von den sekundären Schallquellen abgestrahlten Schallintensität gegen oder auf null.

**[0063]** Um mit den bestimmten Stellgrößen  $\mathbf{w}_{u+1}(k)$  die sekundären Schallquellen 5, 21 zu steuern, werden diese mit dem Referenzwert  $X(k)$  in einem Multiplikationsschritt 45 multipliziert und als Ausgangsgröße  $\mathbf{y}^m(k)$  in einem verbleibenden Schritt 47 aus der Frequenzdomäne in die Zeitdomäne transformiert. Die so erhaltenen Stellgrößen  $\mathbf{y}^m(t)$  können entweder direkt zur Steuerung der sekundären Schallquellen 5, 21 verwendet werden oder noch weiteren Bearbeitungsschritten unterzogen werden.

**[0064]** Das erfindungsgemäße Verfahren gemäß Fig. 2 weist damit alle Vorteile auf, die in der allgemeinen Beschreibung Bezug auf Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens beschrieben worden sind. Insbesondere werden bei der aktiven Unterdrückung des Schalls einer Mehrzahl von primären Schallquellen 3 die Wechselwirkung zwischen den verschiedenen sekundären Schallquellen 5, 21 und eventuelle Phasenunterschiede aufgrund unterschiedlicher Laufzeiten im System oder unterschiedlicher Messverfahren bzw. unterschiedlicher Sensoren berücksichtigt.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall einer Mehrzahl von primären Schallquellen (3) mittels Schalls einer Mehrzahl von sekundären Schallquellen (5, 21), wobei jeder sekundären Schallquelle (5, 21) genau eine primäre Schallquelle (3) zugeordnet ist, wobei zur aktiven Unterdrückung des Schalls der Mehrzahl von primären Schallquellen und zur Reduzierung einer Schallintensität des Schalls der sekundären Schallquellen (5, 21) auf oder gegen null für jede sekundäre Schallquelle (5, 21) eine Stellgröße für die Steuerung der sekundären Schallquelle (5, 21) mit den folgenden Schritten iterativ bestimmt wird:

Bestimmen einer Schnelle jeder primären Schallquelle (3),

Bestimmen einer Schnelle und eines Schalldrucks jeder sekundären Schallquelle (5, 21),

Bestimmen einer effektiv zu unterdrückenden Schnelle für jede sekundäre Schallquelle (5, 21), wobei die effektiv zu unterdrückende Schnelle einer sekundären Schallquelle (5, 21) neben der Schnelle, die für die der betreffenden sekundären Schallquelle zugeordneten primären Schallquelle (3) bestimmt worden ist, auch die für alle sekundären Schallquellen (5, 21) mit Ausnahme der betreffenden sekundären Schallquelle (5, 21) bestimmten Schalldrücke und Schnellen umfasst, und

Bestimmen der Stellgröße für jede sekundäre Schallquelle (5, 21) derart, dass eine Differenz aus der für eine sekundäre Schallquelle (5, 21) bestimmten effektiv zu unterdrückenden Schnelle und der für die sekundäre Schallquelle (5, 21) bestimmten Schnelle minimiert wird, und

wobei die sekundären Schallquellen (5, 21) mit den jeweils bestimmten Stellgrößen gesteuert werden.

2. Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß Anspruch 1, wobei die effektiv zu unterdrückenden Schnellen unter der Annahme bestimmt werden, dass die Schallintensität jeder sekundären Schallquelle (5, 21) null ist.

3. Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei die effektiv zu unterdrückenden

Schnellen unter der Annahme bestimmt werden, dass die von einer sekundären Schallquelle (5, 21) effektiv zu unterdrückende Schnelle der Schnelle entspricht, die für die betreffende sekundäre Schallquelle (5, 21) bestimmt wird.

- 5
4. Verfahren aktiven Unterdrückung von Schall gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Bestimmung der effektiv zu unterdrückenden Schnellen eine Übertragungsstreckenmatrix verwendet wird, wobei mit der Übertragungsstreckenmatrix aus einer für eine sekundäre Schallquelle (5, 21) bestimmten Schnelle ein Anteil der einen sekundären Schallquelle (5, 21) an den für die sekundären Schallquellen (5, 21) bestimmten Schalldrücken bestimmt werden kann.
- 10
5. Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Übertragungsstreckenmatrix für jede sekundäre Schallquelle (5, 21) einen Faktor zur Korrektur eines Phasenunterschieds zwischen dem für eine sekundäre Schallquelle (5, 21) bestimmten Schalldruck und der für die eine sekundäre Schallquelle (5, 21) bestimmten Schnelle umfasst.
- 15
6. Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß Anspruch 4 oder 5, wobei bei der Bestimmung der effektiv zu unterdrückenden Schnellen zunächst Schalldrücke der primären Schallquellen (3) bestimmt werden, in dem die für die sekundären Schallquellen (5, 21) bestimmten Schalldrücke um die Anteile der sekundären Schallquellen (5, 21) bereinigt werden, die mittels der Übertragungsstreckenmatrix aus den für die sekundären Schallquellen (5, 21) bestimmten Schnellen bestimmt werden können.
- 20
7. Verfahren zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur iterativen Bestimmung der Stellgrößen ein Filtered-Reference-Least-Mean-Square Algorithmus verwendet wird.
- 25
8. Verfahren gemäß Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** als eine Referenz in dem Filtered-Reference-Least-Mean-Square Algorithmus eine Abbildung einer für eine der primären Schallquellen (3) bestimmten Schnelle verwendet wird, wobei die Abbildung mittels einer Stellgrößenübertragungsmatrix erfolgt, wobei mit der Stellgrößenübertragungsmatrix von den sekundären Schallquellen (5, 21) in Abhängigkeit von Stellgrößen erzeugte Schnellen bestimmt werden können.
- 30
9. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei jeder primären Schallquelle genau eine sekundäre Schallquelle zugeordnet ist.
- 35
10. System (1) zur aktiven Unterdrückung von Schall mit einem Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das System (1) eine Mehrzahl von Schalldrucksensoren (11), eine Mehrzahl von primären Schnellesensoren (7, 25), eine Mehrzahl von sekundären Schnellesensoren (9, 25), eine Mehrzahl von sekundären Schallquellen (5, 21) und eine Datenverarbeitungseinrichtung (13) umfasst, wobei die Schalldrucksensoren (11), die Schnellesensoren (7, 9, 25) und die sekundären Schallquellen (5, 21) funktionell mit der Datenverarbeitungseinrichtung (13) verbunden sind, wobei das System (1) dazu eingerichtet ist, die Schnelle der primären Schallquelle (3) mittels der primären Schnellesensoren (7, 25) zu bestimmen, wobei das System (1) dazu eingerichtet ist, den Schalldruck der sekundären Schallquellen (5, 21) mittels der Schalldrucksensoren (11) zu bestimmen, wobei das System (1) dazu eingerichtet ist, die Schnelle der sekundären Schallquellen (5, 21) mittels der sekundären Schnellesensoren (9, 25) zu bestimmen, und wobei die Datenverarbeitungseinrichtung (13) dazu eingerichtet ist, aus den bestimmten Schnellen und Schalldrücken Stellgrößen für die sekundären Schallquellen (5, 21) mit einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8 zu bestimmen, und die sekundären Schallquellen (5, 21) mit den bestimmten Stellgrößen zu steuern.
- 40
- 45
- 50
11. System (1) zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß Anspruch 10, wobei zumindest einer der Schnellesensoren (25) ein Lasersensor (25) ist, wobei vorzugsweise zumindest ein primärer Schnellesensor (25) und zumindest ein sekundärer Schnellesensor (25) von einem Lasersensor gebildet werden, wobei der eine Lasersensor sowohl zur Bestimmung einer Schnelle einer primären Schallquelle (3) als auch zur Bestimmung einer Schnelle sekundären Schallquelle (5, 21), der die betreffende primäre Schallquelle (3) zugeordnet ist, verwendet werden kann.
- 55
12. System (1) zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß Anspruch 10 oder 11, wobei zumindest einer der Schnellesensoren (7, 9) eine Hallsonde umfasst.

**EP 3 026 664 A1**

13. System (1) zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei zumindest einer der Schalldrucksensoren (11) ein Mikrofon ist.

5 14. System (1) zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß einem der Ansprüche 10 bis 13, wobei in einem Speicher der Datenverarbeitungseinrichtung (13) die Übertragungstreckenmatrix und/oder die Stellgrößenübertragungsmatrix permanent gespeichert sind.

10 15. System (1) zur aktiven Unterdrückung von Schall gemäß einem der Ansprüche 10 bis 14, wobei eine Anzahl der Schalldrucksensoren (11), der primären Schnellesensoren (9, 25), der sekundären Schnellesensoren (7, 25) und der sekundären Schallquellen (5, 21) gleich ist.

15

20

25

30

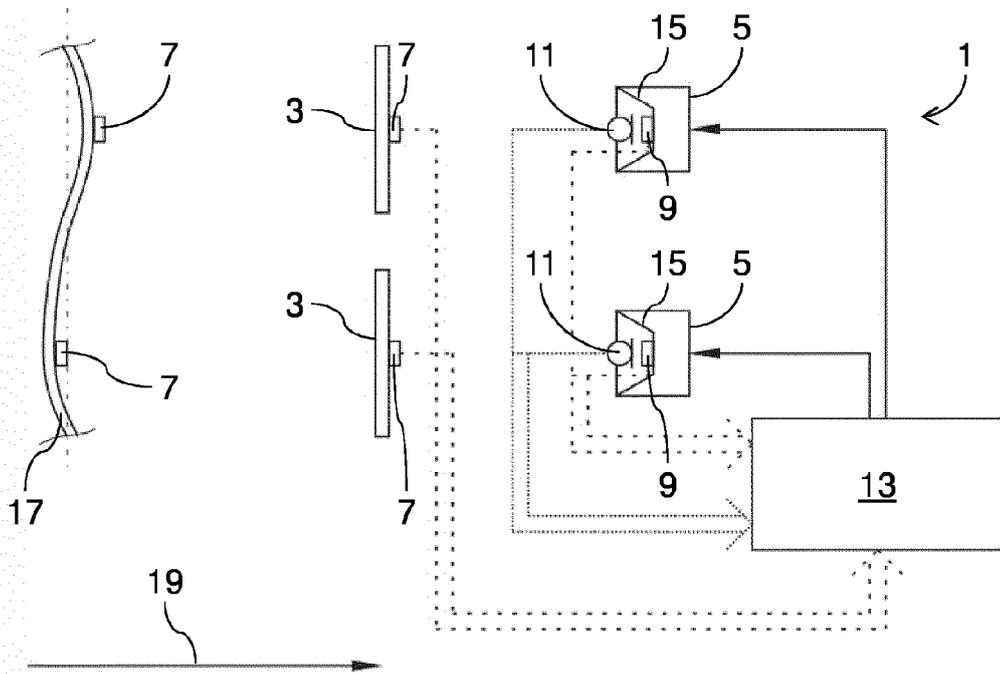
35

40

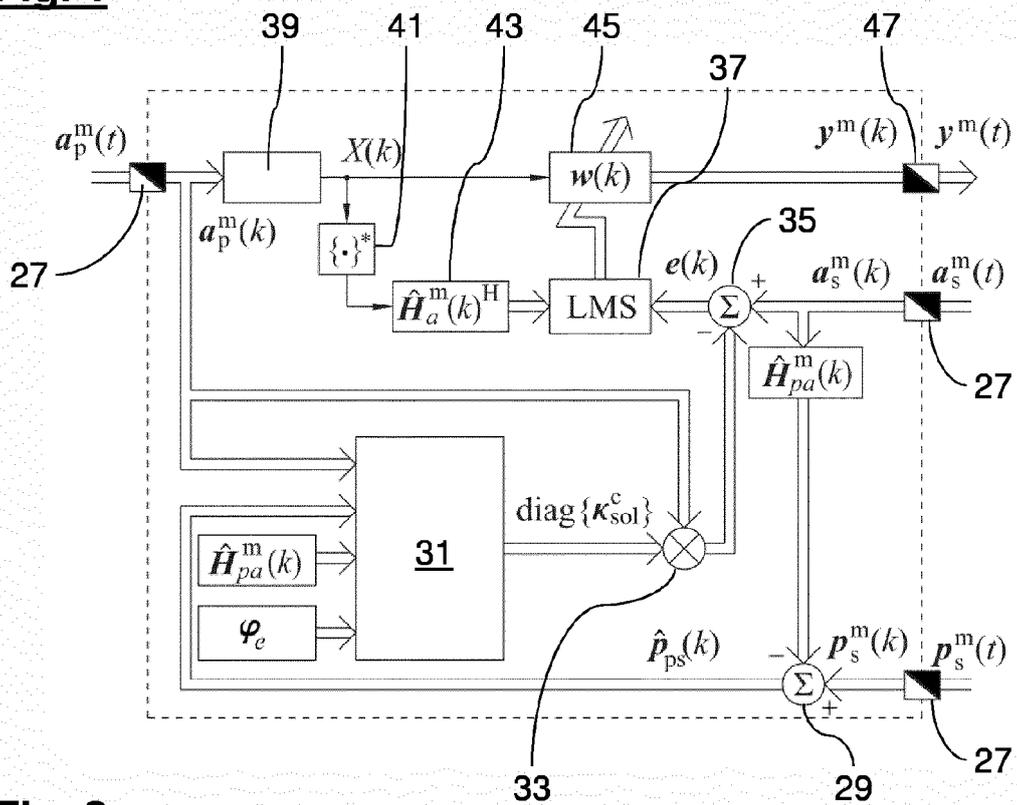
45

50

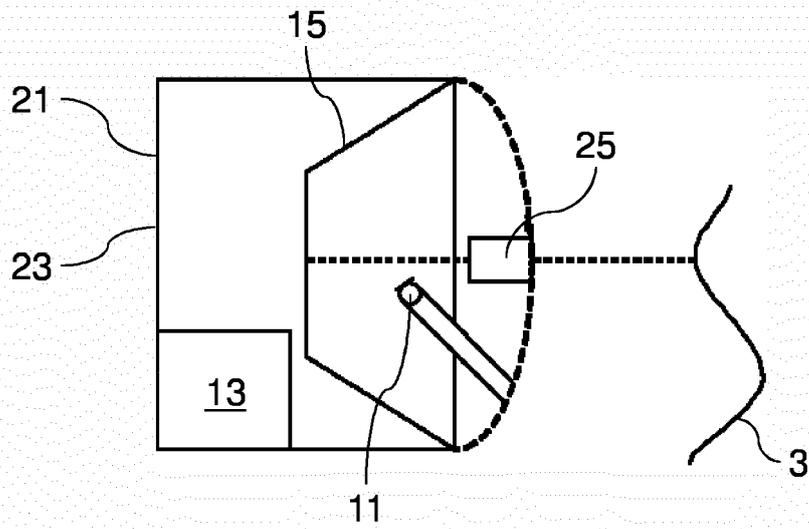
55



**Fig. 1**



**Fig. 2**



**Fig. 3**



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 14 19 5457

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A,D	EP 2 378 513 A1 (HELMUT SCHMIDT UNI [DE]; HAMBURG INNOVATION GMBH [DE]) 19. Oktober 2011 (2011-10-19) * Absätze [0013], [0014] *	1-15	INV. G10K11/178
A	NICK STEFANAKIS ET AL: "Power-output regularization in global sound equalization", THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, Bd. 123, Nr. 1, 1. Januar 2008 (2008-01-01), Seite 33, XP055189001, ISSN: 0001-4966, DOI: 10.1121/1.2816580 * das ganze Dokument *	1-15	
A	US 2009/180627 A1 (BOEHME STEN [DE] ET AL) 16. Juli 2009 (2009-07-16) * Absätze [0015], [0016], [0020], [0040], [0043], [0053], [0064] *	1-15	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			G10K
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 26. Mai 2015	Prüfer Mirkovic, Olinka
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 : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.92 (P04C03)

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

EP 14 19 5457

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

26-05-2015

10  
15  
20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 2378513	A1	19-10-2011	DE 102010014226 A1	24-11-2011
			DK 2378513 T3	24-09-2012
			EP 2378513 A1	19-10-2011
-----				
US 2009180627	A1	16-07-2009	DE 102008011285 A1	25-06-2009
			US 2009180627 A1	16-07-2009
-----				

EPO FORM P0461

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

## IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

### In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 2378513 A1 [0011] [0012]

### 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. *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. Noise Control Foundation, 1995 [0009]