



(10) **DE 10 2015 226 048 B4** 2020.07.16

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 226 048.8**

(22) Anmeldetag: **18.12.2015**

(43) Offenlegungstag: **22.06.2017**

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **16.07.2020**

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

F01N 1/06 (2006.01)

F01N 99/00 (2010.01)

G10K 11/175 (2006.01)

G10K 15/02 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft,
80809 München, DE**

(72) Erfinder:

**Goudarzi, Armin, 14059 Berlin, DE; Rachor,
Julius, 80807 München, DE**

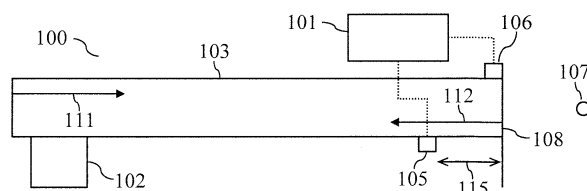
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	199 10 169	B4
DE	694 09 042	T2
DE	697 05 211	T2
DE	20 09 105	A

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Ermittlung und/oder Anpassung des von einer Abgasanlage emittierten Schalls und Steuereinheit dafür**

(57) Hauptanspruch: Verfahren (400) zur Ermittlung des Schalldrucks an einem Umgebungspunkt (107) in einer Umgebung einer Abgasanlage (100); wobei die Abgasanlage (100) ein Abgasrohr (103) mit einer Mündung (108) umfasst, über die Abgase in die Umgebung der Abgasanlage (100) gelangen; wobei das Verfahren (400) umfasst,

- Ermitteln (401) eines Gesamtdrucks an einer Mess-Position im Abgasrohr (103);
- Ermitteln (402), auf Basis des Gesamtdrucks, einer Funktion für eine erste Schalldruckwelle (111), die sich zur Mündung (108) des Abgasrohres (103) bewegt; und
- Ermitteln (403) eines Ist-Pegels des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt (107) auf Basis der Funktion für die erste Schalldruckwelle (111).



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine entsprechende Steuereinheit zur Ermittlung und/oder Anpassung, insbesondere zur Reduzierung oder gezielten Erhöhung der von einer Abgasanlage eines Verbrennungsmotors emittierten Schalleistung.

[0002] Aktive Geräusch-Kontroll-Verfahren (auf Englisch Active Noise Control, ANC, Verfahren) können dazu verwendet werden, die emittierte Schalleistung am Ausgang eines Abgasrohres einer Abgasanlage eines Fahrzeugs gezielt zu verändern. Insbesondere können ANC-Verfahren verwendet werden, um zumindest teilweise den Schall (d.h. insbesondere die Schalleistung) am Ausgang einer Abgasanlage zu reduzieren, und um damit einen (passiven) Schalldämpfer des Fahrzeugs zu unterstützen und ggf. zu ersetzen.

[0003] Zum technischen Hintergrund wird beispielsweise auf die DE 697 05 211 T2, die DE 694 09 042 T2 und die DE 199 10 169 B4 hingewiesen.

[0004] Der von einer Abgasmündung emittierte Schall wird typischerweise von der Umwelt (z.B. von einer Person im Umfeld des Fahrzeugs) in einem gewissen Abstand von der Mündung des Abgasrohres der Abgasanlage wahrgenommen. Da Sensoren des ANC-Systems typischerweise in der Abgasanlage angeordnet sind, ist die Einstellung des Schalldrucks an derart entfernten Umgebungspunkten nicht möglich, da zusätzlich verschiedene Faktoren wie Schallreflexionen, Schallüberlagerungen und sich verändernde Zustandsgrößen das entstehende Schallfeld beeinflussen.

[0005] Das vorliegende Dokument befasst sich mit der technischen Aufgabe, ein Verfahren und eine Steuereinheit bereitzustellen, durch die der durch eine Abgasanlage bewirkte Schall in einem Umfeld der Abgasanlage in präziser und effektiver Weise ermittelt und ggf. angepasst werden kann.

[0006] Die Aufgabe wird durch die unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen werden u.a. in den abhängigen Ansprüchen beschrieben.

[0007] Gemäß einem Aspekt wird ein Verfahren zur Ermittlung des Schalldrucks an einem beliebigen Umgebungspunkt im Fernfeld in einer Umgebung einer Abgasanlage beschrieben. Das Verfahren kann weiter darauf ausgerichtet sein, den Schalldruck an dem Umgebungspunkt anzupassen bzw. zu verändern (beispielsweise zu dämpfen oder ggf. zu verstärken).

[0008] Die Abgasanlage umfasst ein Abgasrohr mit einer Mündung, über die Abgase in die Umgebung der Abgasanlage gelangen. Dabei ist ein Querschnitt der Mündung typischerweise substantiell kleiner als eine Länge des Abgasrohres. Die Abgasanlage kann insbesondere dazu verwendet werden, die Abgase eines Verbrennungsmotors abzuführen. Dabei weist der Verbrennungsmotor typischerweise ein oder mehrere Zylinder auf, die mit einer bestimmten Zündfrequenz gezündet werden, um eine Welle (insbesondere eine Kurbelwelle) anzutreiben. Die Zündfrequenz hängt dabei von einer (gewünschten) Motordrehzahl der Welle ab, und steigt typischerweise mit steigender Motordrehzahl. Als Folge aus der regelmäßigen Zündung der ein oder mehreren Zylinder eines Verbrennungsmotors weist der über die Abgase transportierte Schalldruck typischerweise signifikante spektrale Anteile bei ein oder mehreren Wellen-Frequenzen ω auf (die typischerweise Vielfache voneinander sind). Das Verfahren kann darauf ausgerichtet sein, den Pegel des Schalldrucks für die ein oder mehreren Wellen-Frequenzen des Schalldrucks zu ermitteln und ggf. anzupassen, die sich aus der Motordrehzahl und/oder aus der Anzahl von Zylindern eines Verbrennungsmotors ergeben.

[0009] Das Verfahren umfasst das Ermitteln eines Gesamtdrucks an einer (ersten) Mess-Position im Abgasrohr. Der Gesamtdruck kann dabei mittels eines Drucksensors (insbesondere mittels eines Mikrofons) an der Mess-Position in dem Abgasrohr erfasst werden. Dabei liefert ein Drucksensor typischerweise den Realteil eines komplexen Gesamtdrucks, wobei der komplexe Gesamtdruck eine (planare) Gesamtdruckwelle in dem Abgasrohr repräsentiert. Insbesondere kann der komplexe Gesamtdruck die Amplitude und die Phase der (planaren) Gesamtdruckwelle anzeigen.

[0010] Das Verfahren umfasst weiter das Ermitteln, auf Basis des (erfassten) Gesamtdrucks, einer Funktion für eine erste Schalldruckwelle, die sich zur Mündung des Abgasrohres hin bewegt. Dabei kann die erste Schalldruckwelle im Abgasrohr als planare Welle beschrieben werden. Typischerweise ergibt sich der Gesamtdruck, der im Inneren eines Abgasrohres erfasst werden kann, aus der Überlagerung einer ersten Schalldruckwelle, die sich im Abgasrohr in Richtung zu der Mündung hin bewegt und die das Abgasrohr teilweise über die Mündung verlässt, und einer zweiten Schalldruckwelle, die dadurch entsteht, dass die erste Schalldruckwelle an der Mündung (typischerweise größtenteils) reflektiert wird und die sich daher von der Mündung in das Abgasrohr hinein bewegt. Aus der Überlagerung der ersten (hinlaufenden) Schalldruckwelle und der zweiten (rücklaufenden) Schalldruckwelle ergibt sich im Abgasrohr typischerweise eine stehende Welle. Der von der stehenden Welle zu einem bestimmten Mess- bzw. Abtast-Zeitpunkt und an einer bestimmten Mess-Posi-

on verursachte Gesamtdruck kann von einem Drucksensor erfasst werden. Dabei kann die stehende Welle im Abgasrohr typischerweise als planare Welle beschrieben werden.

[0011] Auf Basis von Wellengleichungen für die erste Schalldruckwelle und für die zweite Schalldruckwelle (die insbesondere über einen Reflexionsfaktor miteinander verknüpft sind) kann aus dem erfassten Gesamtdruck an einer (ggf. einzigen) Mess-Position eine Funktion (insbesondere eine Wellengleichung) für die erste Schalldruckwelle ermittelt werden.

[0012] Das Verfahren umfasst weiter das Ermitteln eines Ist-Pegels (bzw. einer Ist-Energie) des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt auf Basis der Funktion für die erste Schalldruckwelle. Da nur die erste Schalldruckwelle (teilweise) das Abgasrohr verlässt, ermöglicht es die Funktion für die erste Schalldruckwelle, den Pegel des Schalldrucks an einem Umgebungspunkt außerhalb der Abgasanlage in präziser Weise zu bestimmen. Die präzise Bestimmung des Pegels des Schalldrucks an einem Umgebungspunkt kann insbesondere für die Anpassung der von einer Abgasanlage emittierten Geräusche bzw. Klänge und/oder für Messzwecke vorteilhaft sein.

[0013] Das Ermitteln der Funktion für die Schalldruckwelle kann umfassen, das Ermitteln eines Reflexionsfaktors r für die erste Schalldruckwelle an der Mündung des Abgasrohres. Dabei zeigt der Reflexionsfaktor r typischerweise an, wie die erste Schalldruckwelle an der Mündung reflektiert wird, und dabei eine zweite Schalldruckwelle entsteht, die sich von der Mündung in das Abgasrohr bewegt. Die zweite (rücklaufende) Schalldruckwelle kann als Funktion des (komplexen) Reflexionsfaktors und der Funktion für die erste Schalldruckwelle, insbesondere durch Multiplizieren der Funktion für die erste Schalldruckwelle mit dem Reflexionsfaktor r , bestimmt werden. Über den Reflexionsfaktor r kann die stehende Welle in dem Abgasrohr (die durch den Gesamtdruck erfasst wird) als (alleinige) Funktion für die erste Schalldruckwelle beschrieben werden. Folglich kann durch Umformulierung die Funktion für die erste Schalldruckwelle auch in Abhängigkeit von dem Reflexionsfaktor r ermittelt werden.

[0014] Der Reflexionsfaktor r kann dabei im Vorfeld durch Messungen für die Abgasanlage ggf. für unterschiedliche Betriebsparameter (Motordrehzahl, Frequenz, Abgastemperatur, und/oder Abgasgeschwindigkeit) ermittelt und als Kennfeld hinterlegt werden. So kann der Reflexionsfaktor r in Ressourceneffizienter Weise während des Betriebs der Abgasanlage ermittelt werden.

[0015] Wie bereits oben dargelegt, können die Abgase der Abgasanlage von einem Verbrennungsmotor stammen, der mit einer Motordrehzahl betrie-

ben wird. Insbesondere kann die Abgasanlage Teil eines Kraftfahrzeugs, insbesondere eines Straßenkraftfahrzeugs, sein.

[0016] Das Ermitteln der Funktion für die Schalldruckwelle kann umfassen, das Ermitteln einer Wellen-Frequenz ω der ersten Schalldruckwelle, in Abhängigkeit von der Motordrehzahl. Mit anderen Worten, es kann die Wellen-Frequenz ω ermittelt werden, für die die Funktion für die erste Schalldruckwelle bestimmt werden soll. Es kann somit die erste Schalldruckwelle in einem bestimmten Frequenzbereich um die Wellen-Frequenz ω beschrieben werden.

[0017] Das Ermitteln der Funktion für die erste Schalldruckwelle kann weiter umfassen, das Ermitteln eines komplexen Gesamtdruck-Anteils für die Wellen-Frequenz an der Mess-Position, auf Basis des von dem Drucksensor erfassten Gesamtdrucks und auf Basis der Wellen-Frequenz der ersten Schalldruckwelle. Der erfasste Gesamtdruck stellt typischerweise einen Abtastwert der breitbandigen stehenden Gesamtdruckwelle im Abgasrohr an der Mess-Position zu einem Mess- bzw. Abtast-Zeitpunkt dar. Dieser Abtastwert repräsentiert den Realteil der breitbandigen stehenden Gesamtdruckwelle. Aus diesem Realteil kann ein (schmalbandiger) komplexer Gesamtdruck-Anteil für die Wellen-Frequenz ermittelt werden. Dieser komplexe Gesamtdruck-Anteil enthält einen Realteil und einen Imaginärteil und zeigt somit die Amplitude und die Phase der stehenden Gesamtdruckwelle (in dem Frequenzbereich um die Wellen-Frequenz) an. Die Ermittlung des komplexen Gesamtdruck-Anteils kann dabei auf Basis von mindestens zwei zeitlich aufeinander folgenden Mess- bzw. Abtastwerten des Gesamtdrucks an der Mess-Position ermittelt werden. Die Funktion für die Schalldruckwelle kann dann auf Basis des komplexen Gesamtdruck-Anteils für die Wellen-Frequenz ermittelt werden.

[0018] Das Ermitteln des komplexen Gesamtdruck-Anteils kann insbesondere umfassen, das Abwärts-Mischen des vom Drucksensor erfassten Gesamtdrucks um die Wellen-Frequenz mittels eines Quadraturmischers, um einen Cosinus-Anteil und einen Sinus-Anteil zu ermitteln. Insbesondere kann eine zeitliche Abfolge von Messwerten des Gesamtdrucks mit einer Cosinus-Funktion mit der Wellen-Frequenz multipliziert werden, um eine zeitliche Abfolge des Cosinus-Anteils zu ermitteln. In analoger Weise kann die zeitliche Abfolge von Messwerten des Gesamtdrucks mit einer Sinus-Funktion mit der Wellen-Frequenz multipliziert werden, um eine zeitliche Abfolge des Sinus-Anteils zu ermitteln. So kann die zeitliche Abfolge von Messwerten des Gesamtdrucks auf die Frequenz 0 Hz herunter gemischt werden. Des Weiteren kann eine Tiefpass-Filterung erfolgen, um die zeitliche Abfolge des Cosinus-Anteils und des Sinus-

Anteils zu ermitteln und auf den Bereich um die Wellen-Frequenz zu beschränken).

[0019] Es kann dann ein Betrag des komplexen Gesamtdruck-Anteils für die Wellen-Frequenz auf Basis der Summe der Quadrate des Cosinus-Anteils und des Sinus-Anteils ermittelt werden. Außerdem kann der Realteil des komplexen Gesamtdruck-Anteils für die Wellen-Frequenz durch Aufwärts-Mischen des Cosinus-Anteils und des Sinus-Anteils um die Wellen-Frequenz mittels eines Quadraturmischers ermittelt werden (d.h. wiederum durch Multiplizieren mit einer Cosinus-Funktion bzw. mit einer Sinus-Funktion). Der Imaginärteil des komplexen Gesamtdruck-Anteils kann dann aus dem Betrag und dem Realteil unter Berücksichtigung des zeitlichen Gradienten des Realteils bestimmt werden. Somit kann allein auf Basis von Abtastwerten des Gesamtdrucks an der Mess-Position und auf Basis der Wellen-Frequenz ω ein komplexer Gesamtdruck-Anteil p_1 für die Wellen-Frequenz ω ermittelt werden, der die stehende Welle im Abgasrohr an der Mess-Position im Frequenzbereich um die Wellen-Frequenz ω beschreibt.

[0020] Die Funktion für die erste Schalldruckwelle mit der Wellen-Frequenz ω umfasst typischerweise eine Amplitude und eine Phase. Insbesondere kann die erste Schalldruckwelle als eine komplexe Zahl mit Betrag bzw. Amplitude und Phase beschrieben werden. Dabei können die Amplitude und die Phase basierend auf dem komplexen Gesamtdruck-Anteil und auf dem Reflexionsfaktor ermittelt werden. Wie bereits oben dargelegt, stellt die stehende Welle eine Überlagerung der ersten Schalldruckwelle und der zweiten Schalldruckwelle dar, wobei sich die zweite Schalldruckwelle aus der ersten Schalldruckwelle über den Reflexionsfaktor ergibt. Der komplexe Gesamtdruck-Anteil zeigt die Amplitude und die Phase der stehenden Welle (für die Wellen-Frequenz) an. Folglich können die Amplitude und die Phase der ersten Schalldruckwelle aus dem komplexen Gesamtdruck-Anteil und aus dem Reflexionsfaktor ermittelt werden.

[0021] Insbesondere kann die Funktion $p_{hin}(t, x)$ der ersten Schalldruckwelle auf Basis folgender Formel ermittelt werden:

$$p_{hin}(t, x) = \tilde{p}_{hin} e^{j(\omega(t+t_0) - k_1(x_1+x))}$$

[0022] Dabei ist ω die Wellen-Frequenz, x_1 ein (Innen-)Abstand der Mess-Position zur Mündung des Abgasrohrs, und k_1 eine Wellenzahl der ersten Schalldruckwelle. Die o.g. Formel beschreibt die erste Schalldruckwelle als Funktion der Zeit t (relativ zu einem Zeitpunkt t_0) und als Funktion des Innen-Abstands x zur Mündung (relativ zum Innen-Abstand x_1 der Mess-Position).

[0023] Die Werte $\tilde{p}_{hin}$ und t_0 hängen dabei von dem komplexen Gesamtdruck-Anteil p_1 und dem Reflexionsfaktor ab. Insbesondere können die Werte durch folgende Formeln bestimmt werden:

$$\tilde{p}_{hin} = \left| \frac{p_1}{e^{-jk_1x_1} + re^{jk_2x_1}} \right|$$

und

$$t_0 = -\frac{\ln \left(\frac{p_{ges}}{r p_{hin} (e^{-jk_1x_1} + e^{jk_2x_1}) + (1-r) p_{hin} e^{-jk_1x_1}} \right)}{j\omega}$$

[0024] Dabei ist r der Reflexionsfaktor, $p_1 = p_{ges}$ entspricht dem komplexen Gesamtdruck-Anteil, k_2 ist eine Wellenzahl der zweiten Schalldruckwelle, und $\ln$ ist der natürliche Logarithmus. Somit kann die Funktion der ersten Schalldruckwelle in analytischer Weise aus dem mit einem einzigen Sensor (an einer zeitlichen Abfolge von Abtast-Zeitpunkten) erfassten Gesamtdruck ermittelt werden.

[0025] Das Ermitteln des Ist-Pegels des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt kann umfassen, das Ermitteln eines Volumenstromes, insbesondere einer zeitlichen Änderung des Volumenstromes, der Abgase an der Mündung des Abgasrohrs auf Basis der Funktion der ersten Schalldruckwelle. Außerdem kann ein Außen-Abstand des Umgebungspunktes von der Mündung ermittelt werden. Der Ist-Pegel kann dann auf Basis des Außen-Abstands und auf Basis des Volumenstromes, insbesondere auf Basis der zeitlichen Änderung des Volumenstromes, ermittelt werden.

[0026] Insbesondere kann der Ist-Pegel $p(R)$ an dem Umgebungspunkt auf Basis folgender Formel ermittelt werden

$$p(R) = \frac{\rho}{4\pi R} \frac{dQ \left(t - \frac{R}{c} \right)}{dt}$$

[0027] Dabei ist R der (Außen-)Abstand des Umgebungspunktes von der Mündung, Q der Volumenstrom von Abgasen an der Mündung, c die Schallgeschwindigkeit im Freifeld ($c=340\text{m/s}$), δ die Dichte der

Luft, und $\frac{dQ}{dt}$ die zeitliche Änderung des Volumenstromes. Der Volumenstrom Q hängt dabei von der ersten (d.h. hinlaufenden) Schallwelle ab. Die Schallleistung an der Mündung ergibt sich dabei als das Produkt aus dem Volumenstrom Q und dem Schalldruck $p(0)$ an der Mündung.

[0028] Die Funktion für die erste Schalldruckwelle kann von einer Temperatur der Abgase und/oder von einer Geschwindigkeit der Abgase abhängen. Insbesondere kann die Dichte δ der Abgase von der Temperatur der Abgase abhängen. Des Weiteren kann die Schallgeschwindigkeit c der Abgase von der Temperatur der Abgase abhängen. Außerdem können die Wellenzahlen k_1 bzw. k_2 der ersten bzw. zweiten Schalldruckwelle von der Geschwindigkeit der Abgase abhängen. Dabei können im Rahmen des beschriebenen Verfahrens Annahmen in Bezug auf eine typischer Abgastemperatur (z.B. 300°-500°C) bzw. auf eine typische Abgasgeschwindigkeit (z.B. 0-50 m/s) gemacht werden. Alternativ können die Temperatur der Abgase und/oder die Geschwindigkeit der Abgase durch entsprechende Sensoren im Abgasrohr erfasst werden.

[0029] Das Verfahren kann umfassen, das Ermitteln eines Ziel-Pegels bzw. Zielsignals für den gewünschten Schalldruck an dem Umgebungspunkt. Außerdem kann das Verfahren umfassen, das Erzeugen eines akustischen Signals in Abhängigkeit von dem Ist-Pegel und in Abhängigkeit von dem Ziel-Pegel, insbesondere in Abhängigkeit von einer Abweichung des Ist-Pegels von dem Ziel-Pegel. So kann der Ist-Pegel an dem Umgebungspunkt auf den Ziel-Pegel geregelt werden. Somit kann eine präzise Einstellung des Pegels des Schalldrucks an einem Umgebungspunkt der Abgasanlage erfolgen, auch unter Berücksichtigung von Bodenreflexionen und der Überlagerung mehrerer Abgasmündungen.

[0030] Das Verfahren kann umfassen, das Ermitteln, auf Basis des Gesamtdrucks, einer Mehrzahl von Funktionen für die erste Schalldruckwelle an einer Mehrzahl von unterschiedlichen Wellen-Frequenzen. Insbesondere können dabei die Wellen-Frequenzen ausgewählt werden, an denen der von der Abgasanlage emittierte Schall signifikante Energien aufweist.

[0031] Das Verfahren kann weiter umfassen das Ermitteln einer Mehrzahl von Ist-Pegeln des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt für die Mehrzahl von unterschiedlichen Wellen-Frequenzen auf Basis der Mehrzahl von Funktionen. Des Weiteren kann eine Mehrzahl von Ziel-Pegeln für den Schalldruck an dem Umgebungspunkt ermittelt werden. Es kann dann eine Mehrzahl von akustischen Signalen in Abhängigkeit von der Mehrzahl von Ist-Pegeln und in Abhängigkeit von der Mehrzahl von Ziel-Pegeln erzeugt und überlagert werden. So kann das Klangbild der Abgasanlage in präziser Weise (über ein breites Frequenzspektrum) eingestellt werden.

[0032] Die Abgasanlage kann eine Mehrzahl von Abgasrohren umfassen. Für jedes der Mehrzahl von Abgasrohren kann jeweils eine Funktion für eine erste (hinlaufende) Schalldruckwelle in dem jeweiligen Abgasrohr ermittelt werden. Der Ist-Pegel des Schall-

drucks an dem Umgebungspunkt kann dann auf Basis der Mehrzahl von Funktionen ermittelt und ggf. angepasst werden.

[0033] Wie bereits oben dargelegt, kann der Reflexionsfaktor auf Basis von Messungen für eine Abgasanlage ermittelt werden. Alternativ oder ergänzend kann der Reflexionsfaktor durch Ermitteln eines Gesamtdrucks an einer zweiten Mess-Position im Abgasrohr (mittels eines zweiten Drucksensors) ermittelt werden (z.B. für noch nicht ausgemessene Abgasanlagen).

[0034] Insbesondere kann auf Basis des Gesamtdrucks an der (ersten) Mess-Position ein (erster) komplexer Gesamtdruck-Anteil an der (ersten) Mess-Position ermittelt werden (anhand des in diesem Dokument beschriebenen Verfahrens). Des Weiteren kann auf Basis des Gesamtdrucks an der zweiten Mess-Position ein zweiter komplexer Gesamtdruck-Anteil an der zweiten Mess-Position ermittelt werden (anhand des in diesem Dokument beschriebenen Verfahrens).

[0035] Der Reflexionsfaktor kann dann basierend auf einem Verhältnis aus dem (ersten) komplexen Gesamtdruck-Anteil und dem zweiten komplexen Gesamtdruck-Anteil, insbesondere als

$$r = \frac{p_2 e^{-jk_1 x_1} - p_1 e^{-jk_1 x_2}}{p_1 e^{jk_2 x_2} - p_2 e^{-jk_2 x_1}}$$

frequenz- und temperaturabhängig ermittelt werden. Dabei ist r der Reflexionsfaktor, p_1 der (erste) komplexe Gesamtdruck-Anteil an der (ersten) Mess-Position x_1 , p_2 der zweite komplexe Gesamtdruck-Anteil an der zweiten Mess-Position x_2 , k_1 die Wellenzahl der ersten Schalldruckwelle, k_2 die Wellenzahl der zweiten Schalldruckwelle, und e die Eulersche Zahl.

[0036] Gemäß einem weiteren Aspekt wird eine Steuereinheit für eine Abgasanlage beschrieben. Die Abgasanlage umfasst ein Abgasrohr mit einer Mündung, über die Abgase in eine Umgebung der Abgasanlage gelangen. Die Steuereinheit ist eingerichtet, einen Gesamtdruck an einer Mess-Position im Abgasrohr zu ermitteln. Außerdem ist die Steuereinheit eingerichtet, auf Basis des Gesamtdrucks, eine Funktion für eine erste Schalldruckwelle zu ermitteln, die sich zur Mündung des Abgasrohres hin bewegt. Des Weiteren ist die Steuereinheit eingerichtet, einen Ist-Pegels des Schalldrucks an einem Umgebungspunkt in der Umgebung der Abgasanlage auf Basis der Funktion für die erste Schalldruckwelle zu ermitteln.

[0037] Gemäß einem weiteren Aspekt wird eine Abgasanlage für einen Verbrennungsmotor beschrieben.

ben, die die in diesem Dokument beschriebene Steuereinheit umfasst.

[0038] Gemäß einem weiteren Aspekt wird ein Fahrzeug (insbesondere ein Straßenkraftfahrzeug z.B. ein Personenkraftwagen, ein Lastkraftwagen oder ein Motorrad) beschrieben, das die in diesem Dokument beschriebene Abgasanlage umfasst.

[0039] Gemäß einem weiteren Aspekt wird ein Software (SW) Programm beschrieben. Das SW Programm kann eingerichtet werden, um auf einem Prozessor ausgeführt zu werden, und um dadurch das in diesem Dokument beschriebene Verfahren auszuführen.

[0040] Gemäß einem weiteren Aspekt wird ein Speichermedium beschrieben. Das Speichermedium kann ein SW Programm umfassen, welches eingerichtet ist, um auf einem Prozessor ausgeführt zu werden, und um dadurch das in diesem Dokument beschriebene Verfahren auszuführen.

[0041] Es ist zu beachten, dass die in diesem Dokument beschriebenen Verfahren, Vorrichtungen und Systeme sowohl alleine, als auch in Kombination mit anderen in diesem Dokument beschriebenen Verfahren, Vorrichtungen und Systemen verwendet werden können. Desweiteren können jegliche Aspekte der in diesem Dokument beschriebenen Verfahren, Vorrichtungen und Systemen in vielfältiger Weise miteinander kombiniert werden. Insbesondere können die Merkmale der Ansprüche in vielfältiger Weise miteinander kombiniert werden.

[0042] Im Weiteren wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen näher beschrieben. Dabei zeigen

Fig. 1 ein Blockdiagramm einer beispielhaften Abgasanlage;

Fig. 2 beispielhafte Wellen in einem Abgasrohr;

Fig. 3 beispielhafte Berechnungsschritte zur Ermittlung einer hinlaufenden Schallwelle; und

Fig. 4 ein Ablaufdiagramm eines beispielhaften Verfahrens zur Ermittlung des Schalls im Umfeld einer Abgasanlage.

[0043] Wie eingangs dargelegt, befasst sich das vorliegende Dokument mit der effizienten und präzisen Ermittlung und ggf. Anpassung des Schalls in einem Umfeld einer Abgasanlage. In diesem Zusammenhang zeigt **Fig. 1** ein Blockdiagramm einer beispielhaften Abgasanlage **100**. Die Abgasanlage **100** umfasst eine Abgasquelle **102** (z.B. einen Verbrennungsmotor und ggf. einen Teil der Abgasanlage **100**), von der Abgase mit einer bestimmten Abgasgeschwindigkeit in einem Abgasrohr **103** bereitgestellt werden, und von dort aus der Abgasanlage **100** be-

fördert werden. Mit den Abgasen verläuft eine Schallwelle **111** (eine hinlaufende oder erste Welle) von der Abgasquelle **102** zu einer Mündung **108** des Abgasrohrs.

[0044] An der Mündung **108** wird ein (substantieller) Teil der hinlaufenden Schallwelle **111** reflektiert, so dass eine rücklaufende oder zweite Schallwelle **112** generiert wird, die sich mit der hinlaufenden Welle **111** überlagert und eine stehende Welle im Abgasrohr **103** erzeugt. Dies ist in **Fig. 2** durch beispielhafte hinlaufende Schallwellen **111** (durchgezogene Linien) und beispielhafte entsprechende rücklaufende Schallwellen **112** (gestrichelte Linien) mit unterschiedlichen Amplituden veranschaulicht. Des Weiteren zeigt **Fig. 2** die entsprechenden stehenden Schallwellen **210** mit unterschiedlichen Amplituden.

[0045] Der Schall (insbesondere der Schalldruck) an einem Umgebungspunkt **107** in einer Umgebung der Abgasanlage **100** hängt (ggf. nur) von der hinlaufenden Schallwelle **108** insbesondere (ggf. nur) von dem Anteil der hinlaufenden Schallwelle **108** ab, der über die Mündung **108** das Abgasrohr **103** verlässt.

[0046] Andererseits kann durch einen Drucksensor **105** im Inneren des Abgasrohrs **103** typischerweise nur der durch die stehende Schallwelle **210** erzeugte Schalldruck (als Gesamtdruck) erfasst werden. Als Folge daraus eignen sich die durch den Drucksensor **105** erfassten Schalldruckdaten nicht direkt für eine präzise Anpassung des Schalls (insbesondere des Schalldrucks) an einem Umgebungspunkt **107**, der außerhalb der Abgasanlage **100** liegt.

[0047] Die in **Fig. 1** dargestellte Abgasanlage **100** umfasst eine Steuereinheit **101**, die eingerichtet ist, einen akustischen Aktuator **106** (insbesondere einen Lautsprecher) anzusteuern, um den Schall an einem Umgebungspunkt **107** der Abgasanlage **100** zu verändern. Beispielsweise kann von dem Aktuator **106** ein akustisches Signal generiert werden, durch die der Schalldruckpegel an dem Umgebungspunkt **107** reduziert, ggf. minimiert, wird. Andererseits kann von dem Aktuator **106** ein akustisches Signal generiert werden, durch die eine Zusammensetzung des Schalls bzw. Klangs am Umgebungspunkt **107** verändert wird (z.B. um eine bestimmte Ordnung des Verbrennungsmotors zu ergänzen, zu verstärken oder zu dämpfen). Dabei kann die Steuereinheit **101** eingerichtet sein, den Aktuator **106** in Abhängigkeit von den Schalldruckdaten des Drucksensors **105** anzusteuern. Insbesondere kann die Steuereinheit **101** eingerichtet sein, dass in **Fig. 4** dargestellte Verfahren **400** auszuführen, um den Schall (insbesondere den Schalldruck) an dem Umgebungspunkt **107** der Abgasanlage **100** zu ermitteln und ggf. anzupassen.

[0048] Das Verfahren **400** umfasst das Ermitteln **401** von Schalldruckdaten, die den Gesamtdruck in ei-

nem Abgasrohr **103** der Abgasanlage **100** anzeigen. Insbesondere umfasst das Verfahren das Ermitteln **401** eines Gesamtdrucks an einer Mess-Position im Abgasrohr **103**. Außerdem umfasst das Verfahren **400** das Ermitteln **402**, auf Basis der Schalldruckdaten bzw. auf Basis des Gesamtdrucks, einer ersten (d.h. hinlaufenden) Schallwelle **111**, die sich zur Mündung **108** des Abgasrohres **103** hin bewegt (und damit zumindest teilweise das Abgasrohr **103** in Richtung zum Umgebungspunkt **107**) verlässt. Des Weiteren umfasst das Verfahren **400** das Ermitteln des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt **107**, auf Basis der ermittelten Funktion der ersten Schallwelle **111**. Außerdem kann in Abhängigkeit von der ersten Schallwelle ein akustisches Signal generiert werden, um den Schalldruck an dem Umgebungspunkt **107** anzupassen. Durch die Berücksichtigung der ersten Schallwelle kann eine präzise Einstellung des Schalldrucks an einem Umgebungspunkts **107** bewirkt werden.

[0049] Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, mit dem die erste bzw. hinlaufende Schallwelle **111** in effizienter Weise auf Basis des, mit einem Drucksensor **105** erfassten, Gesamtdrucks ermittelt werden kann. Dabei wird insbesondere ein Verfahren beschrieben, dass eine Berechnung der hinlaufenden Schallwelle **111** (d.h. einer Funktion der hinlaufenden Schallwelle **111**) im Zeitbereich und damit in ressourceneffizienter Weise ermöglicht. Das beschriebene Verfahren kann somit in Echtzeit angewendet werden.

[0050] Die Berechnung der hinlaufenden Schallwelle p_{hin} **111** erfordert typischerweise die Kenntnis des komplexen Reflexionsfaktor r an der Mündung **108** des Abgasrohres **103** und die Kenntnis des komplexen Gesamtschalldrucks $p(x, t)$ an einem Ort und Zeitpunkt im Abgasrohr **103**.

[0051] Zur Berechnung des Reflexionsfaktors r können zwei Drucksensoren **105** (z.B. Mikrofone) mit unterschiedlichen Abständen **115** zur Mündung **108** (x_1 bzw. x_2) verwendet werden. Auf Basis der beiden Drucksensoren **105** können ein erster komplexer Gesamtschalldruck $p_1(x_1)$ (am Ort des ersten Drucksensors **105**) und ein zweiter komplexer Gesamtschalldruck $p_2(x_2)$ (am Ort des zweiten Drucksensors **105**) ermittelt werden.

[0052] Anhand eines Drucksensors **105** kann typischerweise nur der Realteil **301** des komplexen Gesamtschalldrucks $p(x, t)$ erfasst werden. Aus der Motordrehzahl kann darüber hinaus die Frequenz f bzw. die Kreisfrequenz ω (in diesem Dokument auch als die Wellen-Frequenz bezeichnet) einer bestimmten Motorordnung ermittelt werden. Mittels eines Quadraturmischers **300** (siehe **Fig. 3**) kann der Realteil **301** des komplexen Gesamtdrucks $p(x, t)$ (d.h. der Messwert eines Drucksensors **105**) um die zu

mindernde Frequenz ω abwärtsgemischt und Tiefpass-gefiltert werden (z.B. mittels eines Bessel Tiefpass-Filters **303**, da dieser Phasenneutral arbeitet, was insbesondere für ANC-Anwendungen von Vorteil ist). Die Tiefpassfilterung **303** wirkt sich dabei wie eine Bandpassfilterung um die gewünschte Kreisfrequenz ω aus. Da der Realteil **301** des komplexen Gesamtdrucks $p(x, t)$ im Quadraturmischer **300** in einen äquivalenten Realteil und Imaginärteil aufgeteilt wird und die betrachtete Frequenz auf null Hertz abwärtsgemischt wurde, bleiben nach der Tiefpassfilterung zwei Gleichanteile (in diesem Dokument auch als Cosinus-Anteil und Sinus-Anteil bezeichnet) übrig, aus denen die Amplitude **312** des komplexen (gefilterten) Gesamtdrucks $p(x, t)$ bestimmt werden kann (mittels der Amplitudenermittlung **310**). Andererseits kann durch Aufwärtsmischen des Realteils und Imaginärteils (d.h. des Cosinus-Anteils und des Sinus-Anteils) der Realteil **302** des (bandgefilterten) Gesamtdrucks **210** für eine bestimmte Kreisfrequenz ω ermittelt werden.

[0053] Da nun Betrag und Realteil des monofrequenten Gesamtschalldrucks (in diesem Dokument auch als Gesamtdruck-Anteil bezeichnet) bekannt sind, kann über den Differenzenquotienten des Realteils eindeutig der Imaginärteil bestimmt werden. Der Differenzenquotient ist erforderlich, da zu jedem Realteil sonst zwei Imaginärteile bestimmt werden könnten, da die Funktion nicht injektiv ist. Auf Basis des Realteils **302** des aktuellen Zeitschrittes und des Realteils **302** des vorhergehenden Zeitschrittes kann der Gradient des Realteils **302** ermittelt werden. Mithilfe des Gradienten kann der Imaginärteil eindeutig bestimmt werden.

[0054] Der Reflexionsfaktor r kann aus dem Verhältnis der komplexen Schalldrücke bestimmt werden

$$r = \frac{p_2 e^{-jk_1 x_1} - p_1 e^{-jk_1 x_2}}{p_1 e^{jk_2 x_2} - p_2 e^{jk_2 x_1}}$$

wobei $k_1 = \frac{\omega}{c + v_M}$, $k_2 = \frac{\omega}{c - v_M}$ die Wellenzahlen der ersten (hinlaufenden) Schallwelle **111** und der zweiten (rücklaufenden) Schallwelle **112** sind, mit c , der (Abgastemperatur-abhängigen) Schallgeschwindigkeit und v_M , der Abgasgeschwindigkeit. Somit kann der komplexe Reflexionsfaktor r auf Basis der komplexen Gesamtschalldrücke $p_1(x_1)$ und $p_2(x_2)$ (insbesondere auf Basis des Verhältnisses der komplexen Gesamtschalldrücke $p_1(x_1)$ und $p_2(x_2)$) von zwei Drucksensoren **105** mit unterschiedlichen Abständen x_1 und x_2 zur Mündung **108** berechnet werden.

[0055] Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass der Reflexionsfaktor r je nach Abgastemperatur,

Abgasgeschwindigkeit v_M und Frequenz ω etwa $r = 0.95e^{i\pi}$ beträgt. Es kann somit für eine bestimmte Abgasanlage **100** (und ggf. für bestimmte Betriebsparameter, wie Abgastemperatur, Abgasgeschwindigkeit, Mündungsdurchmesser und/oder Wellen-Frequenz) ein fest gewählter Reflexionsfaktor r verwendet werden, so dass ein Drucksensor **105** eingespart werden kann. Die Ergebnisse in Bezug auf die Anpassung des Schalls werden dabei nur geringfügig beeinträchtigt.

[0056] Die erste Schallwelle $p_{hin}(t_0)$ zum Zeitpunkt t_0 (und an der Mess-Position des Sensors **105**) kann auf Basis des komplexen Schalldrucks $p_1(x_1)$ des Sensors **105** an der Position x_1 und auf Basis des Reflexionsfaktors r berechnet werden als

$$p_{hin} = \tilde{p}_{hin} e^{j(\omega t_0 - k_1 x_1)}$$

mit

$$\tilde{p}_{hin} = \left| \frac{p_1}{e^{-jk_1 x_1} + r e^{jk_2 x_1}} \right|$$

[0057] Aus dem komplexen Gesamtdruck $p_1(x_1)$ des Sensors **105** kann somit mit dem Reflexionsfaktor r eindeutig der Wert $\tilde{p}_{hin}$ der hinlaufenden Schallwelle **111** berechnet werden. Mit dem Wert $\tilde{p}_{hin}$ und dem Reflexionsfaktor r kann berechnet werden, an welchem Zeitpunkt t_0 die hinlaufende Welle **111** und die durch die hinlaufende Welle **111** erzeugte rücklaufende Welle **112** eine stehende Welle **210** mit den gemessenen komplexen Gesamtdruck $p_1(x_1)$ ergibt. Nach Ermittlung des Zeitpunktes t_0 ist die hinlaufende Welle **111** vollständig beschrieben und der Realteil der hinlaufenden Welle **111** bestimmbar. Der Realteil der hinlaufenden Welle **111** kann z.B. dazu verwendet werden, ein akustisches Signal zu erzeugen, um den Schalldruck an einem Umgebungspunkt **107** zu verändern (z.B. auf einen Ziel-Pegel zu regeln).

[0058] Mit Kenntnis der hinlaufenden Schallwelle **111** lässt sich der komplexe Außenschallpegel an einem Umgebungspunkt **107** mit dem Abstand R zur Mündung **108** berechnen als

$$p(R) = j\rho\omega v_a \alpha^2 \frac{e^{-jkR}}{R}$$

wobei v_a die Schallschnelle des Abgases an der Mündung **108** ist, wobei a der Radius der Mündung **108** ist, und wobei ρ die Dichte der Umgebungsluft ist.

[0059] Die Schallschnelle v_a des Abgases ergibt sich dabei abhängig von der Dichte $\rho(T)$ des Abgases und der Schallgeschwindigkeit $c(T)$ des Abgases. Dabei gilt für die Dichte $\rho(T)$ des Abgases

$$\rho(T) = \frac{p_0}{R_S T}$$

mit der spezifischen Gaskonstante R_S (z.B. für Luft $R_S = 287.058 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), mit T der Temperatur des Abgases und mit p_0 dem Umgebungsluftdruck der Umgebung des Fahrzeugs (z.B. für Meeresspiegellhöhe $p_0 = 101325 \text{ Pa}$). Für eine ebene hinlaufende Welle ergibt sich die Schallschnelle für die hinlaufende Welle **111**

$$v_{hin} = \frac{p_{hin}}{\rho(T)c(T)}.$$

[0060] Für die Schallgeschwindigkeit $c(T)$ des Abgases gilt

$c(T) = \sqrt{1.33 \frac{8.3145}{0.02896} T}$. Aus der Beziehung $p_{ges} = p_{hin} + r p_{hin}$ für den Gesamtdruck im Abgasrohr **103** und aus dem Trägheitsgesetz der Akustik

$v = \frac{j}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial x}$ ergibt sich die Schallschnelle v_a an der Mündung **108** als

$$v_a = v_{hin} - r v_{hin}.$$

[0061] Bei der Formel für den komplexen Außenschallpegel impliziert der Term $j\omega$ eine Zeitableitung und wirkt wie eine zeitliche Ableitung der Schallschnelle. Der Term e^{-jkR} lässt sich im Zeitbereich als

zeitliche Verzögerung $e^{j\omega \frac{R}{c}}$ interpretieren. Es ergibt sich somit im Zeitbereich für den Außenschallpegel

$$p = \frac{\rho}{4\pi R} \frac{dQ\left(t - \frac{R}{c}\right)}{dt}.$$

[0062] Dabei wird ersichtlich, dass der emittierte Schall (insbesondere der Schalldruck) proportional zum Gradienten des Volumenflusses $Q = 4\pi v_a a^2$ an der Mündung **108** ist.

[0063] Aus der hinlaufenden Schallwelle $p_{hin}(x, t)$ und der Abgastemperatur T kann somit die Schallschnelle v_a bestimmt werden und somit der Volumenstrom Q in der Mündung **108** des Abgasrohres **103**. Der Volumenstrom Q ist ein direktes Maß für die Schallemission und ermöglicht es den Außenschallpegel $p(R)$ an einem Umgebungspunkt **107** zu berechnen.

[0064] Für Messanwendungen kann ggf. der Gesamtdruck im Abgasrohr in einem bestimmten Frequenzbereich ω ausgewertet werden.

[0065] Sollen mehrere Mündungen **108** oder Bodenreflexionen berücksichtigt werden (z.B. bei einer mehrbordigen Abgasanlage **100**), so können die komplexen Schalldrücke $p(R)$ der einzelnen Abgasrohre **103** nach dem Spiegelschallquellen- bzw. Superpositionsprinzip überlagert werden. Dabei ergibt sich mit steigender Frequenz ω durch die kürzeren Wellenlängen typischerweise eine substantielle ortsabhängige Überlagerung.

[0066] Mithilfe der hinlaufenden Welle kann auch die Schallwirkleistung P in einem Abgasrohr **103** berechnet werden. Die Schallwirkleistung P ist mit der Querschnittsfläche $S = 4\pi a^2$

$$\begin{aligned} P &= p_{hin} q_{hin} \\ &= p_{hin} v_{hin} S \\ &= \frac{p_{hin}^2}{\rho(T) c(T)} S \end{aligned}$$

[0067] Das Verfahren zur Bestimmung des Volumenstroms Q in der Mündung **108** und des emittierten Schalldrucks $p(R)$ kann in analoger Weise breitbandig angewendet werden. Insbesondere kann der emittierte Schall bzw. Schalldruck $p(R)$ für eine Mehrzahl von unterschiedlichen Wellen-Frequenzen ω ermittelt werden. So kann der Schalldruck an einem bestimmten Umgebungspunkt **107** für eine Mehrzahl von unterschiedlichen Wellen-Frequenzen ω angepasst werden. Dabei können zu Laufzeitkompensation ggf. unterschiedliche (Frequenzabhängige) Übertragungsfunktionen für den Regelkreis zwischen Erfassen eines Messwertes mit einem Drucksensor **105** und Ausgabe eines akustischen Signals berücksichtigt werden.

[0068] In diesem Dokument wurde ein Verfahren beschrieben, mit dem der Reflexionsfaktor r im Zeitbereich für schmalbandige Signale (d.h. für eine Wellen-Frequenz ω) im Zeitbereich mittels zweier Drucksensoren **105** im Abgasrohr **103** ermittelt werden kann. Des Weiteren wurde ein Verfahren beschrieben, mit dem der komplexe Gesamtschalldruck p_1 in einem Abgasrohr **103** für schmalbandige Signale (ggf. mit einem einzigen Sensor **105**) im Abgasrohr **103** im Zeitbereich (und damit ressourceneffizient) ermittelt werden kann. Außerdem wurde ein Verfahren beschrieben, mit dem die hinlaufende Schallwelle $p_{hin}(t)$ im Zeitbereich und die daraus resultierende Schallschnelle v_a bzw. der daraus resultierende Volumenstrom Q ermittelt werden können. Es kann dann eine ANC-Regelung auf die hinlaufende Schallwelle **111** im Rohr **103** erfolgen.

[0069] Außerdem wurde ein Verfahren beschrieben, um den schmalbandigen, emittierten Mündungsschall $p(R)$ im Zeitbereich zu ermitteln. Des Weiteren kann mit den in diesem Dokument beschriebenen

Verfahren der überlagerte Mündungsschall für mehrere Mündungen **108** im Zeitbereich für jeden beliebigen Außenpegel-Messort **107** ermittelt werden.

[0070] Mit den beschriebenen Verfahren kann auf Basis der Messung des Gesamtdrucks an einer bestimmten Stelle im Abgasrohr **103** mittels eines Sensors **105** der Außenschallpegel $p(R)$ an einem Umgebungspunkt **107** außerhalb der Abgasanlage **100** ermittelt werden. Es kann somit für einen beliebigen Umgebungspunkt **107** eine Außenschallpegel-Zielgröße vorgegeben werden und es kann auf diese Außenschallpegel-Zielgröße geregelt werden. Dabei können für unterschiedliche Frequenzen ω unterschiedliche Außenschallpegel-Zielgrößen vorgegeben werden, um das Klangbild der emittierten Geräusche an dem Umgebungspunkt **107** zu formen. Die beschriebenen Verfahren ermöglichen somit ein adaptives Sounddesign durch die Vorgabe von konkreten Außenpegel-Regelungszielgrößen.

[0071] Durch die Implementierung der beschriebenen Verfahrens ist das Geräuschminderungspotential eines ANC-Systems seitens der Regelung unabhängig von der Länge des Endrohrs **103**, von der Lage des Sensors **105** und/oder von der zu mindern- den Frequenz ω . Weiter benötigt die beschriebene Signalverarbeitung nicht zwingend zusätzliche Sensoren **105**, so dass die Verfahren in existierenden Abgasanlagen umgesetzt werden können und so dass keine zusätzlichen Kosten entstehen.

[0072] Durch die Kenntnis der hinlaufenden Welle **111** werden eine genaue Prognose des Außenschallpegels $p(R)$ und somit ein präzises, adaptives Sound-Design ermöglicht. Ferner wird die Minderung in Bezug auf die benötigte Wirkleistung des akustischen Aktuators **106** effizienter. Es erfolgt somit eine optimale Nutzung der akustischen und folglich der elektrischen Leistung, so dass der Energieverbrauch für die Geräuschminderung reduziert werden kann.

[0073] Darüber hinaus besteht die Möglichkeit den Außenpegel durch Messungen mit Hilfe von zusätzlichen Sensoren im Endrohr **103** im Frequenz- und Zeitbereich zu bestimmen. Insbesondere kann durch Verwendung von zwei Drucksensoren **105** an unterschiedlichen (Innen-)Abständen x_1 und x_2 zur Mündung **108** der komplexe Reflexionsfaktor r bestimmt und daraus die komplexe hinlaufende Schallwelle **111** ermittelt werden.

[0074] Zur Ermittlung des Reflexionsfaktor r auf Basis der Messwerte der beiden Drucksensoren **105** kann das o.g. Verfahren im schmalbandigen Bereich für unterschiedliche Frequenzen ω im Zeitbereich durchgeführt werden. Alternativ können die komplexen Schalldrücke p_1 und p_2 für die beiden Drucksensoren **105** mittels einer Fouriertransformation der Sensorsignale im Frequenzbereich ermittelt

werden. Dabei können anhand der Sensoren **105** die Schalldrücke für konkrete unterschiedliche Motordrehzahlen bestimmt werden. Bei einem gemessenen Drehzahlhochlauf erfolgt dies beispielsweise in einem Spektrogramm über Drehzahl und Frequenz. Die komplexen Schalldrücke der beiden Sensoren können dann über

$$r = \frac{p_2 e^{-jk_1 x_1} - p_1 e^{-jk_1 x_2}}{p_1 e^{jk_2 x_2} - p_2 e^{jk_2 x_1}}$$

dazu verwendet werden, den Reflexionsfaktor r zu ermitteln. Der Reflexionsfaktor wird somit aus dem Verhältnis der komplexen Schalldrücke bestimmt. Dabei kann die Tatsache ausgenutzt werden, dass die Amplitude der hinlaufenden Welle **111** an beiden Mess-Position des Drucksensoren **105** gleich ist.

[0075] Mithilfe des Reflexionsfaktors kann nun die Amplitude der hinlaufenden Welle **111**

$$\tilde{p}_{hin} = \frac{\frac{p_1}{e^{-jk_1 x_1} + r e^{jk_2 x_1}}}{\frac{p_2}{e^{-jk_1 x_2} + r e^{jk_2 x_2}}}$$

und die hinlaufende Welle selbst bestimmt werden

$$p_{hin}(x) = \tilde{p}_{hin} e^{-jk_1 x}$$

[0076] Somit werden keine aufwändigen Anbauten bei mobilen Mündungsschallmessungen benötigt und die Ergebnisse werden nicht von Windrauschen verfälscht. Bei Rollenprüfstandsmessungen kann so direkt Messraum-unabhängig die Schallemission bestimmt werden.

[0077] Die vorliegende Erfindung ist nicht auf die gezeigten Ausführungsbeispiele beschränkt. Insbesondere ist zu beachten, dass die Beschreibung und die Figuren nur das Prinzip der vorgeschlagenen Verfahren, Vorrichtungen und Systeme veranschaulichen sollen.

Patentansprüche

1. Verfahren (400) zur Ermittlung des Schalldrucks an einem Umgebungspunkt (107) in einer Umgebung einer Abgasanlage (100); wobei die Abgasanlage (100) ein Abgasrohr (103) mit einer Mündung (108) umfasst, über die Abgase in die Umgebung der Abgasanlage (100) gelangen; wobei das Verfahren (400) umfasst,

- Ermitteln (401) eines Gesamtdrucks an einer Mess-Position im Abgasrohr (103);
- Ermitteln (402), auf Basis des Gesamtdrucks, einer Funktion für eine erste Schalldruckwelle (111), die sich zur Mündung (108) des Abgasrohres (103) bewegt; und
- Ermitteln (403) eines Ist-Pegels des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt (107) auf Basis der Funktion für die erste Schalldruckwelle (111).

2. Verfahren (400) gemäß Anspruch 1, wobei

- das Ermitteln (403) der Funktion für die erste Schalldruckwelle (111) umfasst, Ermitteln eines Reflexionsfaktors für die erste Schalldruckwelle (111) an der Mündung (108) des Abgasrohres (103); wobei der Reflexionsfaktor anzeigt, wie die erste Schalldruckwelle (111) an der Mündung (108) reflektiert wird, und dabei eine zweite Schalldruckwelle (112) bildet, die sich von der Mündung (108) in das Abgasrohr (103) bewegt; und
- die Funktion für die erste Schalldruckwelle (111) auch in Abhängigkeit von dem Reflexionsfaktor ermittelt wird.

3. Verfahren (400) gemäß Anspruch 2, wobei

- die Abgase von einem Verbrennungsmotor mit einer Motordrehzahl stammen;
- der Gesamtdruck mittels eines Drucksensors (105) an der Mess-Position in dem Abgasrohr (103) erfasst wird;
- das Ermitteln (403) der Funktion für die erste Schalldruckwelle (111) umfasst, Ermitteln einer Wellen-Frequenz der ersten Schalldruckwelle (111) in Abhängigkeit von der Motordrehzahl;
- das Ermitteln (403) der Funktion für die erste Schalldruckwelle (111) umfasst, Ermitteln eines komplexen Gesamtdruck-Anteils für die Wellen-Frequenz an der Mess-Position, auf Basis des von dem Drucksensor (103) erfassten Gesamtdrucks und auf Basis der Wellen-Frequenz der ersten Schalldruckwelle (111); und
- die Funktion für die erste Schalldruckwelle (111) auf Basis des komplexen Gesamtdruck-Anteils ermittelt wird.

4. Verfahren (400) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Ermitteln (403) des Ist-Pegels des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt (107) umfasst,

- Ermitteln eines Volumenstromes, insbesondere einer zeitlichen Änderung des Volumenstromes, der Abgase an der Mündung (108) des Abgasrohres (103) auf Basis der Funktion der ersten Schalldruckwelle (111);
- Ermitteln eines Außen-Abstands des Umgebungspunktes (107) von der Mündung (108); und
- Ermitteln des Ist-Pegels auf Basis des Außen-Abstands und auf Basis des Volumenstromes, insbesondere auf Basis der zeitlichen Änderung des Volumenstromes.

5. Verfahren (400) gemäß Anspruch 4, wobei

- der Ist-Pegel an dem Umgebungspunkt (107) auf Basis folgender Formel ermittelt wird:

$$p(R) = \frac{\rho}{4\pi R} \frac{dQ \left(t - \frac{R}{c} \right)}{dt}$$

- R der Außen-Abstand ist, Q der Volumenstrom von Abgasen an der Mündung ist, c eine Schallgeschwindigkeit in der Umgebung der Abgasanlage (100) ist, δ eine Dichte von Luft in der Umgebung der Abgasanlage (100) ist, und $\frac{dQO}{dt}$ die zeitliche Änderung des Volumenstromes ist.

6. Verfahren (400) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Funktion für die erste Schalldruckwelle (111) von einer Temperatur der Abgase und/oder von einer Geschwindigkeit der Abgase abhängt.

7. Verfahren (400) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren (400) umfasst,

- Ermitteln eines Ziel-Pegels für den Schalldruck an dem Umgebungspunkt (107); und
- Erzeugen eines akustischen Signals in Abhängigkeit von dem Ist-Pegel und in Abhängigkeit von dem Ziel-Pegel, insbesondere in Abhängigkeit von einer Abweichung des Ist-Pegels von dem Ziel-Pegel.

8. Verfahren (400) gemäß Anspruch 7, wobei das Verfahren (400) umfasst,

- Ermitteln, auf Basis des Gesamtdrucks, einer Mehrzahl von Funktionen für die erste Schalldruckwelle (111) an einer Mehrzahl von unterschiedlichen Wellen-Frequenzen;
- Ermitteln einer Mehrzahl von Ist-Pegeln des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt (107) für die Mehrzahl von unterschiedlichen Wellen-Frequenzen auf Basis der Mehrzahl von Funktionen;
- Ermitteln einer Mehrzahl von Ziel-Pegeln für den Schalldruck an dem Umgebungspunkt (107);
- Erzeugen einer Mehrzahl von akustischen Signalen in Abhängigkeit von der Mehrzahl von Ist-Pegeln und in Abhängigkeit von der Mehrzahl von Ziel-Pegeln; und
- Überlagern der Mehrzahl von akustischen Signalen.

9. Verfahren (400) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei

- die Abgasanlage (100) eine Mehrzahl von Abgasrohren (103) umfasst;
- für jedes der Mehrzahl von Abgasrohren (103) eine Funktion für eine erste Schalldruckwelle (111) in dem jeweiligen Abgasrohr (103) ermittelt wird; und
- der Ist-Pegel des Schalldrucks an dem Umgebungspunkt (107) auf Basis der Mehrzahl von Funktionen ermittelt wird.

10. Steuereinheit (101) für eine Abgasanlage (100), wobei die Abgasanlage (100) ein Abgasrohr (103) mit einer Mündung (108) umfasst, über die Abgase in eine Umgebung der Abgasanlage (100) gelangen; wobei die Steuereinheit (101) eingerichtet ist,

- einen Gesamtdruck an einer Mess-Position im Abgasrohr (103) zu ermitteln,
- auf Basis des Gesamtdrucks, eine Funktion für eine erste Schalldruckwelle (111) zu ermitteln, die sich zur Mündung (108) des Abgasrohres (103) bewegt; und
- einen Ist-Pegels des Schalldrucks an einem Umgebungspunkt (107) in der Umgebung der Abgasanlage (100) auf Basis der Funktion für die erste Schalldruckwelle (111) zu ermitteln.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

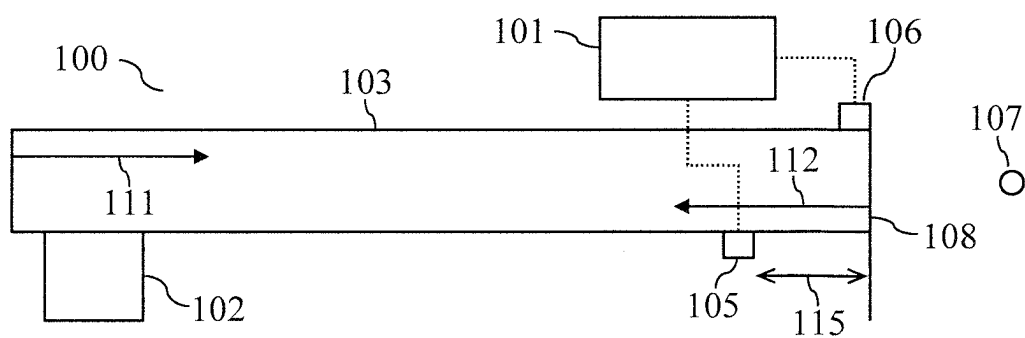


Fig. 1

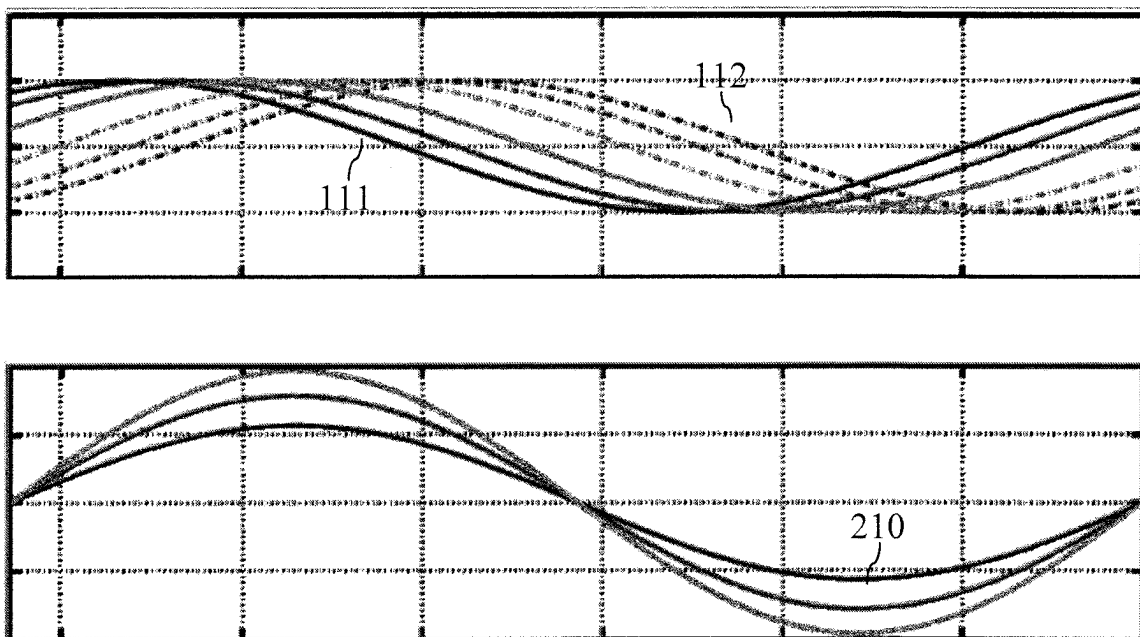
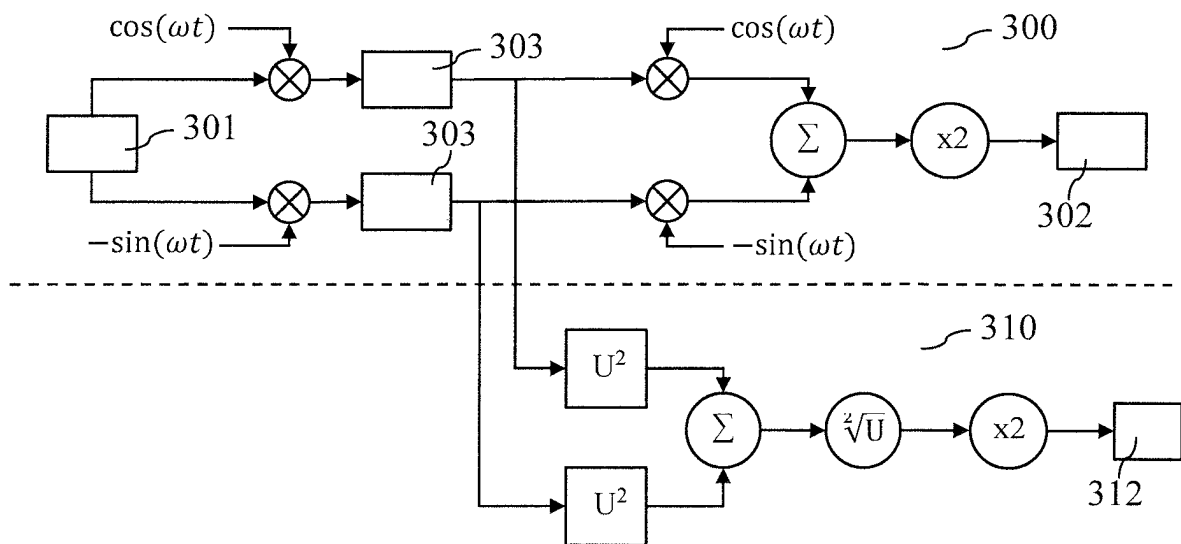
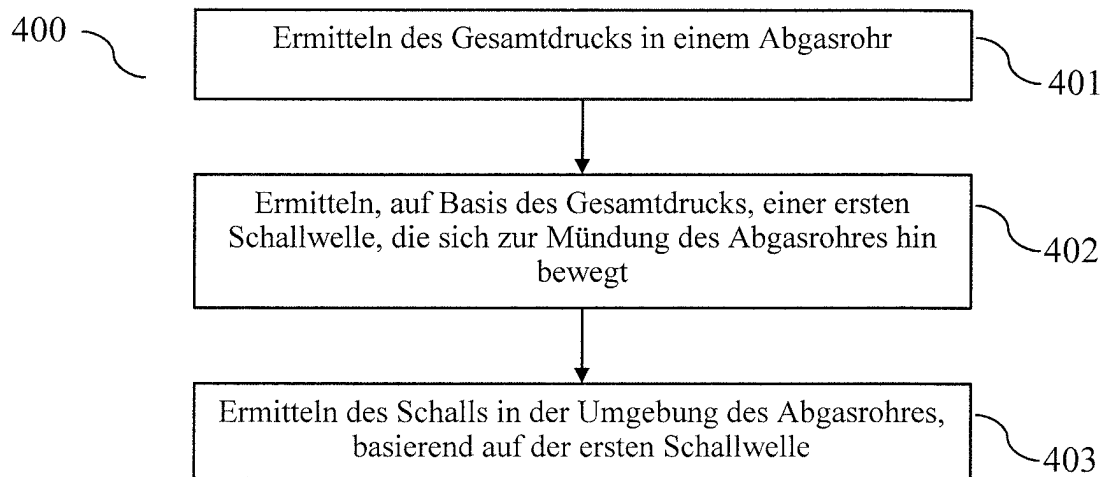


Fig. 2

**Fig. 3****Fig. 4**