

(12) **Patentschrift**

(21) Anmeldenummer: A 210/2008 (51) Int. Cl.⁸: **G01L 1/10**
(22) Anmeldetag: 2008-02-08
(43) Veröffentlicht am: 2009-05-15

(56) Entgegenhaltungen:
AT 500798A2 DE 102004001911A1
EP 1296126B1 DE 19749587C1
DE 10726271A1 DE 10202683A1
DE 19710414A1

(73) Patentanmelder:
AVL LIST GMBH
A-8020 GRAZ (AT)
(72) Erfinder:
HÖLDRICH ROBERT DR.
GRAZ (AT)
SONTACCHI ALOIS DR.
GRATWEIN (AT)
BRANDL STEPHAN DR.
GRAZ (AT)

(54) **VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER ANTEILE EINZELNER ÜBERTRAGUNGSWEGE**

- (57) Ein Verfahren zur Bestimmung der Anteile einzelner Übertragungswege zum betriebsbedingten Gesamtgeräusch einer schallübertragenden Struktur mit sieht folgende Schritte vor:
- Applizieren zumindest eines Beschleunigungsaufnehmers und/oder zumindest eines Quellmikrophons im Bereich jeder Schalleinleitungsposition;
 - Applizieren zumindest eines Zielmikrophons und/oder mindestens eines Beschleunigungsaufnehmers im Bereich einer Empfangsposition;
 - Durchführen zumindest einer gleichzeitigen Messung des Schalldruckes und/oder der Beschleunigung an der Empfangsposition und der Beschleunigung und/oder des Schalldruckes an jeder Schalleinleitungsposition während des Betriebes;
 - Ermittlung zumindest einer Beschleunigung-zu-Druck- und/oder Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktion und/oder zumindest einer Druck-zu-Druck-Empfindlichkeitsfunktion;
 - Ermittlung von reziprok gemessenen Frequenzgangfunktionen zwischen jeder Schalleinleitungsposition und jeder Empfangsposition;
 - Ermittlung der Inertanzen im Betriebszustand, zumindest an einer Schalleinleitungsposition;
 - Ermittlung zumindest einer Kraft an zumindest einer Schalleinleitungsposition auf Basis der berechneten Inertanzen und der im Betrieb gemessenen Beschleunigungen an den Schalleinleitungspositionen.
- Ermittlung der Anteile der einzelnen Übertragungswege.
- Dies ermöglicht eine schnelle und genaue Berechnung der Kräfte und Beiträge von Schallquellen im Betriebszustand.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Anteile einzelner Übertragungswege zum betriebsbedingten Gesamtgeräusch einer schallübertragenden Struktur, insbesondere eines Fahrzeuges.

- 5 Die Schwingungs- bzw. Krafteinleitung und Übertragung in einer schallübertragenden Struktur, wie beispielsweise einer Fahrzeugkarosserie wird üblicherweise mittels der sogenannten "Transfer-Pfad-Analyse" (TPA - Transfer Path Analysis) durchgeführt. Dabei werden für die Krafteinleitungspunkte in die Karosserie die Eingangsinertanzen, sowie die Übertragungsfunktionen von den Krafteinleitungspunkten zu Mikrophonen im Fahrzeuginneren und/oder Schwin-
- 10 gungsmesspunkten an der Karosserie mittels externer Anregung (Shaker, Hammer, etc.) gemessen. Die Auswirkungen der realen Anregungen im Fahrzeugbetrieb auf die Fahrzeugkarosserie wird durch Messung der Beschleunigungen im Fahrzeugbetrieb an den Krafteinleitungspunkten und unter Verwendung der zuvor gemessenen Inertanzen und Übertragungsfunktionen ermittelt. Eine der zeitraubendsten und fehleranfälligsten Aufgaben bei der Anwendung einer
- 15 Transfer-Pfad-Analyse ist die Messung von Inertanzen und Frequenzgang-Funktionen zwischen Schalleinleitungsposition und Schallempfangsposition. Es ist daher ein großes Bedürfnis, die Nachteile dieser zeitraubenden Messungen zu vermeiden.

Aus der AT 500.798 A2 ist ein Verfahren zur möglichst genauen Ermittlung der Kräfte an den Krafteinleitungspunkten einer Fahrzeugkarosserie in Bezug auf das Antriebsaggregat und die Radaufhängungen bekannt. Mittels dieser Kräfte und der Schwingungsübertragungseigenschaften einer Fahrzeugkarosserie ist es möglich, die genauen Geräusch- und Schwingungsanteile von Antriebsstrang und Radaufhängung des Fahrzeuges am Innengeräusch und am Schwingungsverhalten der Karosserie zu bestimmen.

25 Aufgabe der Erfindung ist es daher, die genannten Nachteile zu vermeiden und eine schnelle, sowie genaue Berechnung der Kräfte und Anteile einzelner Übertragungswege zum Gesamtgeräusch bereitzustellen.

30 Erfindungsgemäß wird dies durch folgende Schritte erreicht:

- a) Definieren zumindest einer Schalleinleitungsposition in der schallübertragenden Struktur;
- b) Applizieren zumindest eines Beschleunigungsaufnehmers und/oder zumindest eines Quellmikrophons im Bereich jeder Schalleinleitungsposition;
- 35 c) Definieren zumindest einer Empfangsposition;
- d) Applizieren zumindest eines Zielmikrophons und/oder mindestens eines Beschleunigungsaufnehmers im Bereich der Empfangsposition;
- e) Durchführen zumindest einer gleichzeitigen Messung des Schalldruckes und/oder der Beschleunigung an der Empfangsposition und der Beschleunigung und/oder des Schalldruckes
- 40 an jeder Schalleinleitungsposition während des Betriebes;
- f) Ermittlung zumindest einer Beschleunigung-zu-Druck- und/oder Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktion und/oder zumindest einer Druck-zu-Druck-Empfindlichkeitsfunktion auf Basis der Messung unter e);
- g) Ermittlung von reziprok gemessenen Frequenzgangfunktionen zwischen jeder Schalleinleitungsposition und jeder Empfangsposition;
- 45 h) Ermittlung der Inertanzen im Betriebszustand, zumindest an einer Schalleinleitungsposition, auf der Basis der reziprok gemessenen Frequenzgangfunktionen und der Beschleunigung-zu-Druck- bzw. Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktionen;
- i) Ermittlung zumindest einer Kraft an zumindest einer Schalleinleitungsposition auf Basis der berechneten Inertanzen und der im Betrieb gemessenen Beschleunigungen an den Schalleinleitungspositionen.
- 50 j) Ermittlung der Anteile der einzelnen Übertragungswege aufgrund der berechneten Kräfte und der reziprok gemessenen Frequenzgangfunktionen und/oder aufgrund der Druck-zu-Druck-Empfindlichkeitsfunktionen und/oder der im Betrieb gemessenen Schalldrücke an den
- 55 Schalleinleitungspositionen.

Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren werden Inertanzen auf der Basis zumindest einer operativen Messung im Betriebszustand und unmittelbar daran anschließenden reziprok gemessenen Frequenzgang-Funktionen zwischen der Schallquelle, also der Schalleinleitungsposition und dem Ziel, also der Empfangsposition, berechnet. Diese errechneten Inertanzen können
5 in weiterer Folge dazu verwendet werden, um auftretende Kräfte im Betriebszustand festzustellen. Die Verwendung dieser auftretenden Kräfte erlaubt die Bestimmung und das Identifizieren von Beiträgen der entsprechenden Schallquellen auf den Schalldruck bzw. die Beschleunigung an den Empfangspositionen.

10 Eine wesentliche Verbesserung der Ergebnisse der Berechnung ergibt sich, wenn die Erregung aller Quellen durch das Messen der Beschleunigungen oder Schalldrücke nahe an allen definierten Schalleinleitungspositionen abgedeckt wird. Das Auslassen von nur einer wichtigen Schallquelle würde zu falschen Empfindlichkeits-Funktionen und Inertanzen führen. Zusätzlich wird angenommen, dass die Beschleunigung-zu-Schalldruck- bzw. Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktionen für alle Messungen im Betriebszustand zeitinvariant
15 sind. Weil Position und Richtung der Beschleunigungsmesser konstant sind, bedeutet das zur Erfüllung dieser Annahme, dass die Temperatur der Struktur (z.B. des Chassis bei einem Fahrzeug), während des Messens in den Betriebszuständen so konstant wie nur möglich sein soll. Eine Vorwärmung der Struktur vor dem Messbeginn ist deshalb vorteilhaft.

20 Falls Luftschallübertragung vorliegt, ist es für die Verbesserung der Qualität des Messergebnisses vorteilhaft, wenn Druck-zu-Druck bzw. Druck-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeits-Funktionen für den gesamten Luftschall zwischen den Schalleinleitungspositionen und den Empfangspositionen ermittelt werden und auf der Basis der Druck-zu-Druck- bzw. Druck-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeits-Funktionen und des im Betrieb gemessenen Schalldruckes an den
25 Schalleinleitungspositionen die Luftschall-Anteile am gesamten Schalldruck bzw. an der gesamten Beschleunigung an der Empfangsposition ermittelt und vom gesamten Schalldruck bzw. der gesamten Beschleunigung an der Empfangsposition subtrahiert werden.

30 In der Ausführungsvariante der Erfindung ist vorgesehen, dass die Beschleunigung-zu-Druck- bzw. Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeit für jede Empfangsposition ermittelt und bei der Berechnung der Inertanzen berücksichtigt wird.

35 Ein wesentlicher Schritt des Verfahrens sieht vor, dass auf der Basis der ermittelten Inertanzen eine dynamische Massenmatrix errechnet wird. Dadurch ist es in weiterer Folge möglich, dass auf der Basis der dynamischen Massenmatrix die an den Schalleinleitungspositionen auftretenden Kräfte im Betriebszustand berechnet werden und dass die Anteile der einzelnen Übertragungswege aller Körperschall-Quellen auf der Basis der Kräfte an den Schalleinleitungspositionen im Betriebszustand, sowie den entsprechenden Frequenzgang-Funktionen ermittelt werden.
40

Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt die Berechnung von Inertanzen aus den Messungen im Betriebszustand und den reziprok gemessenen Frequenzgang-Funktionen zwischen Schalleinleitungsposition und Empfangsposition. Die Vorteile dieser neuen Methode bestehen
45 in einer gravierenden Zeiteinsparung und im Vermeiden von, bei Inertanz- und Frequenzgang-Messungen auftretenden, allgemeinen Fehlern. Während der Zeiteinsparungsaspekt dieser Methode offensichtlich ist, wird die Zunahme der Qualität des Ergebnisses im Folgenden noch näher beschrieben.

50 Wie zuvor erwähnt, entstehen die häufigsten Fehler bei der Durchführung einer Transfer-Pfad-Analyse bei der Messung der Inertanzen und bei der Messung der Frequenzgang-Funktionen von der Quelle (Schalleinleitungsposition, Erregungsposition) zum Ziel (Empfangsposition).

Diese Störungen sind größtenteils abhängig von:

- Abweichungen in der Erregungsrichtung,
- Abweichungen in der Erregungsposition, sowie von
- unterschiedlichen Strukturtemperaturen zwischen der im Voraus stattfindenden Vermessung von Inertanzen bzw. Frequenzgang-Funktionen und der Messung im operativen Zustand.

5

Durch Verwendung von reziprok gemessenen Frequenzgang-Funktionen wird die Abweichung in der Erregungsrichtung beseitigt, weil die Richtung der Kraft der gemessenen Frequenzgang-Funktionen identisch mit der Messrichtung des Beschleunigungsaufnehmers ist. Weiters ist es einfacher, einen Beschleunigungsaufnehmer nahe an dem Ursprung der erregenden Quellen zu platzieren als einen Shaker oder einen Hammer zur externen Erregung dort zu platzieren, um die Inertanzen und die Frequenzgang-Funktionen zu messen. Dadurch wird der Fehler, der durch Abweichung von der Schalleinleitungsposition verursacht wird, mit dem vorliegenden Verfahren vermindert.

10

15

Außerdem wird der Fehler, der auf Temperaturunterschieden basiert, durch das reziproke Messen verringert, wenn die reziproke Messung der Frequenzgang-Funktionen zwischen Schalleinleitungsposition und Empfangsposition direkt nach der operativen Messung des Schalldruckes und der Schallbeschleunigung durchgeführt wird. Dadurch können Probleme, die auf dem Unterschied der Temperatur zwischen der operativen und der Inertanzmessung, bzw. der Frequenzgang-Messungen basieren, beseitigt werden.

20

25

Das Messverfahren das für das beschriebene Transfer-Pfad-Analyse-Verfahren benötigt wird, enthält eine Messung im Betriebszustand und eine reziproke Messung der Frequenzgang-Funktionen zwischen Quelle und Ziel. Die Messungen im Betriebszustand können in der gleichen Weise durchgeführt werden, wie für eine konventionelle Transfer-Pfad-Analyse-Messung. Neben den reziprok gemessenen Frequenzgang-Funktionen von der Erregungsposition der betrachteten Kräfte (Beschleunigungsmesserpositionen) zu den Empfangspositionen kann zusätzlich die Druck-zu-Druck- bzw. Druck-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeits-Funktion von den Quellmikrophonen zu den Zielmikrophonen im Verfahren verwendet werden. Jedes mögliche Verfahren zum Ermitteln dieser Empfindlichkeitsfunktionen kann dabei angewendet werden.

30

Nach der Messung sind die folgenden Frequenzgang-Funktionen und operativen Daten verfügbar:

35

- Messung im Betriebszustand
 - o Schalldruck bzw. Beschleunigung an den Empfangspositionen während des Betriebszustandes
 - o Schalldruck an den Quellmikrophonen während des Betriebszustandes
 - o Beschleunigungen an den Schalleinleitungspositionen während des Betriebszustandes
 - o [optional] Druck-zu-Druck- bzw. Druck-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktionen für den gesamten Luftschall zwischen Schallquellen und Empfangspositionen
- reziprok gemessene Frequenzgang-Funktionen
 - o Frequenzgang-Funktionen von Quellpositionen zu den Empfangspositionen

45

Die Erfindung wird im Folgenden an Hand eines Beispieles näher erläutert:

50

Für ein tieferes Verständnis des entwickelten Verfahrens wird im Folgenden eine schrittweise Beschreibung der Theorie angegeben. Dabei werden zugunsten geringerer Komplexität im unten angeführten Beispiel nur Luftschall-Empfangspositionen im Innenraum verwendet. Daher wird nur mit Schalldruck und nicht mit Beschleunigungen an den Empfangspositionen gerechnet. Eine Berechnung mit Beschleunigungen kann aber ident ausgeführt werden. Es wird bei

55

$$= \begin{bmatrix} a_1(f, t_1) & \cdots & a_n(f, t_1) \\ \vdots & & \vdots \\ a_1(f, t_m) & \cdots & a_n(f, t_m) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S(i, 1, f) \\ \vdots \\ S(i, n, f) \end{bmatrix} \quad (2)$$

i ...Position des Antwortmikrophons

f ... Betrachtete Frequenz

$t_1 \dots t_m$...Betrachteter Signalblock

$a_1 \dots a_n$...Betrachtete Beschleunigung

$S(i, j, f)$...Beschleunigung zu Schalldruck Empfindlichkeit für
Antwortmikrophon i und Beschleunigung j bei Frequenz f

Schritt 1.2 - Ermittlung der Beschleunigung-zu-Druck-Empfindlichkeit S ohne Beseitigung des Luftschall-Anteils (alternativ zu Schritt 1.1)

Wenn keine Druck-zu-Druck-Empfindlichkeit bekannt ist, so können alternativ zu Schritt 1.1 die Empfindlichkeiten Beschleunigung-zu-Druck, S , und Druck-zu-Druck gleichzeitig berechnet werden. Die Berechnung der erforderlichen Signale im Frequenzbereich kann wie in Schritt 1.1 erfolgen. Neben den verwendeten Beschleunigungen müssen Schalldrücke p_s an den Quellpositionen betrachtet werden. Die resultierende Gleichung ist in (3) angegeben. Um Fehler zu vermeiden, die auf Unterschiede in der Größe zwischen Schalldruck und Beschleunigung basieren, sollte der Skalierungseffekt berücksichtigt werden.

$$P_{tot\ i}(f) = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p_{tot\ i}(f, t_1) \\ \vdots \\ p_{tot\ i}(f, t_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(f, t_1) & \cdots & a_n(f, t_1) & p_{s1}(f, t_1) & p_{s1}(f, t_1) \\ \vdots & & \vdots & & \\ a_1(f, t_m) & \cdots & a_n(f, t_m) & p_{s1}(f, t_m) & p_{s1}(f, t_m) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S(i, 1, f) \\ \vdots \\ S(i, n, f) \\ D(i, 1, f) \\ D(i, l, f) \end{bmatrix} \quad (3)$$

i ...Position des Antwortmikrophons

$1 \dots m$...Betrachteter Zeitblock

$1 \dots n$...Betrachtete Beschleunigungen

$1 \dots l$...Betrachtete Quellmikrophone

$S(i, j, f)$...Beschleunigung-zu-Schalldruck-Empfindlichkeit für
Antwortmikrophon i und Beschleunigung j bei Frequenz f

$p_{s\ h}$...Schalldruck am Quellmikrophon h

$D(i, h, f)$...Schalldruck-zu-Schalldruck -Empfindlichkeit für
Antwortmikrophon i und Quellmikrophon h bei Frequenz f

Schritt 2 - Ermittlung von Inertanzen

Nachdem man die Beschleunigung-zu-Druck-Empfindlichkeiten, S - wie in Schritt 1.1 beziehungsweise in Schritt 1.2 (abhängig von der Existenz von Druck-zu-Druck-Empfindlichkeiten) beschrieben - berechnet hat, können die benötigten Inertanzen, also die Quotienten aus

Beschleunigungsamplitude und Kraft berechnet werden.

Basierend auf der Reziprozitätsregel sind die reziprok gemessene Frequenzgang-Funktion und die Frequenzgang-Funktion im Betriebszustand gleich zu setzen. Für die Ermittlung von Inertanzen können die reziprok gemessenen Frequenzgang-Funktionen folglich mit den im Betrieb wirkenden Frequenzgang-Funktionen verglichen werden. Die entsprechende Gleichung ist in (4) angegeben und ist Komponentenweise zu lesen.

$$\frac{\bar{a}_{rec}}{\dot{Q}_{i\ rec}}(f) \equiv \frac{p_{i\ op}}{\bar{F}_{op}}(f)$$

$\bar{a}_{rec}$...Beschleunigungen während der Reziprokmessung in Richtung $\bar{F}_{op}$ (4)

$\dot{Q}_{i\ rec}$...Volumenbeschleunigung während der Reziprokmessung am Antwortmikrofon i

$p_{i\ op}$...Schalldruck am Antwortmikrofon i im Betriebszustand

$\bar{F}_{op}$...Vektor der eingeleiteten Kräfte im Betriebszustand

Die im Betriebszustand wirkenden Frequenzgang-Funktionen können im Allgemeinen durch den Zusammenhang in Gleichung (5) beschrieben werden. Neben den Beschleunigung-zu-Druck-Empfindlichkeiten S , die in Schritt 1.1 oder in Schritt 1.2 berechnet werden, werden in Gleichung (5) die gesuchten Inertanzen verwendet:

$$\frac{p_{i\ op}}{\bar{F}_{op}}(f) = \frac{p_{i\ op}}{\bar{a}_{op}}(f) \cdot \frac{\bar{a}_{op}}{\bar{F}_{op}}(f)$$

$p_{i\ op}$...Schalldruck am Antwortmikrofon i im Betriebszustand (5)

$\bar{a}_{op}$...Beschleunigungen im Betriebszustand

$\bar{F}_{op}$...Vektor der im Betriebszustand eingeleiteten Kräfte

Um die gesuchten Inertanzen zu berechnen, werden die Frequenzgang-Funktionen im Betriebszustand durch die reziprok gemessenen Frequenzgang-Funktionen ersetzt, wie in Gleichung (6) angegeben ist:

$$\frac{\bar{a}_{rec}}{\dot{Q}_{i\ rec}}(f) = \frac{p_{i\ op}}{\bar{a}_{op}}(f) \cdot \frac{\bar{a}_{op}}{\bar{F}_{op}}(f)$$

$\bar{a}_{rec}$...Beschleunigungen während der Reziprokmessung in Richtung $\bar{F}_{op}$ (6)

$\dot{Q}_{i\ rec}$...Volumenbeschleunigung während der Reziprokmessung am Antwortmikrofon i

$p_{i\ op}$...Schalldruck am Antwortmikrofon i im Betriebszustand

$\bar{a}_{op}$...Beschleunigungen im Betriebszustand

$\bar{F}_{op}$...Vektor eingeleiteter Kräfte im Betriebszustand

Unter Anwendung der Gleichung (6) können Inertanzen aus der in Schritt 1.1 bzw. Schritt 1.2 ermittelten Beschleunigung-zu-Druck-Empfindlichkeit S und den reziprok gemessenen

Frequenzgang-Funktionen berechnet werden. Diese Methode kann für jede mögliche Zahl an Freiheitsgraden durchgeführt werden. Die Methode wird an Hand eines Beispiels mit drei Kräften und drei Beschleunigungen (z.B. Erregung bei einem Lager) in Gleichung (7) gezeigt.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \frac{a_{1\text{rec}}(f)}{\dot{Q}_{1\text{rec}}} \\ \frac{a_{2\text{rec}}(f)}{\dot{Q}_{2\text{rec}}} \\ \frac{a_{3\text{rec}}(f)}{\dot{Q}_{3\text{rec}}} \end{bmatrix}^T = [S(i,1,f) \ S(i,2,f) \ S(i,3,f)] \cdot \begin{bmatrix} \frac{a_{11}(f)}{\bar{F}_1} & \frac{a_{12}(f)}{\bar{F}_2} & \frac{a_{13}(f)}{\bar{F}_3} \\ \frac{a_{21}(f)}{\bar{F}_1} & \frac{a_{22}(f)}{\bar{F}_2} & \frac{a_{23}(f)}{\bar{F}_3} \\ \frac{a_{31}(f)}{\bar{F}_1} & \frac{a_{32}(f)}{\bar{F}_2} & \frac{a_{33}(f)}{\bar{F}_3} \end{bmatrix} = \\
 & = [S(i,1,f) \ S(i,2,f) \ S(i,3,f)] \cdot \begin{bmatrix} I_{11}(f) & I_{12}(f) & I_{13}(f) \\ I_{21}(f) & I_{22}(f) & I_{23}(f) \\ I_{31}(f) & I_{32}(f) & I_{33}(f) \end{bmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

$\bar{F}_j$...Kraft in Richtung j

a_{kj} ...Beschleunigung in Richtung k verursacht durch Kraft j

I_{kj} ...Inertanz zwischen Beschleunigung k und Kraft j

Aus Berechnungsgründen müssen in diesem Fall neun Inertanzen berechnet werden. Folglich sind neun lineare Gleichungen für eindeutige Resultate notwendig. Um diese Anzahl an Gleichungen zu erhalten, müssen reziprok gemessene Frequenzgang-Funktionen an drei Zielmikrophonpositionen $i=1..3$ vorhanden sein. Die Positionen der Zielmikrophone müssen dabei so gewählt werden, dass die entsprechenden Schalldrucksignale von einander ausreichend statistisch unabhängig sind. Die statistische Unabhängigkeit hängt von der Wellenzahl k und dem Abstand r zwischen den Zielmikrophonpositionen zusammen, wobei $\sin kr / kr \leq 0.5$ empfohlen wird. Betrachtet man eine Frequenz von 100 Hz, so ist etwa 1 m zwischen den Zielmikrophonen erforderlich.

Für die Berechnung werden für jede Frequenz f alle Inertanzen in einem Vektor aufgelistet, und es wird eine passende Matrix, welche die Werte der Beschleunigung-zu-Druck-Empfindlichkeiten S enthält, aufgestellt. Die resultierende Beziehung wird in Gleichung (8) angegeben:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \frac{a_{1\text{rec}}(f)}{\dot{Q}_{1\text{rec}}} \\ \frac{a_{2\text{rec}}(f)}{\dot{Q}_{2\text{rec}}} \\ \frac{a_{3\text{rec}}(f)}{\dot{Q}_{3\text{rec}}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} I_{11}(f) \\ I_{12}(f) \\ I_{13}(f) \\ I_{21}(f) \\ I_{22}(f) \\ I_{23}(f) \\ I_{31}(f) \\ I_{32}(f) \\ I_{33}(f) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} S(1,1,f) & 0 & 0 & S(2,1,f) & 0 & 0 & S(3,1,f) & 0 & 0 \\ 0 & S(1,1,f) & 0 & 0 & S(2,1,f) & 0 & 0 & S(3,1,f) & 0 \\ 0 & 0 & S(1,1,f) & 0 & 0 & S(2,1,f) & 0 & 0 & S(3,1,f) \\ S(1,2,f) & 0 & 0 & S(2,2,f) & 0 & 0 & S(3,2,f) & 0 & 0 \\ 0 & S(1,2,f) & 0 & 0 & S(2,2,f) & 0 & 0 & S(3,2,f) & 0 \\ 0 & 0 & S(1,2,f) & 0 & 0 & S(2,2,f) & 0 & 0 & S(3,2,f) \\ S(1,3,f) & 0 & 0 & S(2,3,f) & 0 & 0 & S(3,3,f) & 0 & 0 \\ 0 & S(1,3,f) & 0 & 0 & S(2,3,f) & 0 & 0 & S(3,3,f) & 0 \\ 0 & 0 & S(1,3,f) & 0 & 0 & S(2,3,f) & 0 & 0 & S(3,3,f) \end{bmatrix} \quad (8)
 \end{aligned}$$

Um die Zahl an erforderlichen Zielmikrophonen zu verringern, kann die angenommene Symmetrie der Inertanz Matrix ausgenutzt werden. Folglich müssen anstelle von M^2 Inertanzen nur noch $(M^2/2 + M/2)$ Elemente berechnet werden. Die Formel für den verringerten Satz von Inertanzen ist in Gleichung (9) angegeben. Für diese Gleichung ist die Matrix der Beschleunigung-zu-Druck-Empfindlichkeiten durch Aufsummieren von zwei symmetrischen Inertanzen in einer Reihe berechnet.

$$\begin{bmatrix} \frac{a_{1,rec}}{\dot{Q}_{1,rec}}(f) \\ \frac{a_{2,rec}}{\dot{Q}_{1,rec}}(f) \\ \frac{a_{3,rec}}{\dot{Q}_{1,rec}}(f) \\ \frac{a_{1,rec}}{\dot{Q}_{2,rec}}(f) \\ \frac{a_{2,rec}}{\dot{Q}_{2,rec}}(f) \\ \frac{a_{3,rec}}{\dot{Q}_{2,rec}}(f) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} I_{11}(f) \\ I_{12}(f) \\ I_{13}(f) \\ I_{22}(f) \\ I_{23}(f) \\ I_{33}(f) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} S(1,1,f) & 0 & 0 & S(2,1,f) & 0 & 0 \\ S(1,2,f) & S(1,1,f) & 0 & S(2,2,f) & S(2,1,f) & 0 \\ S(1,3,f) & 0 & S(1,1,f) & S(2,3,f) & 0 & S(2,1,f) \\ 0 & S(1,2,f) & 0 & 0 & S(2,2,f) & 0 \\ 0 & S(1,3,f) & S(1,2,f) & 0 & S(2,3,f) & S(2,2,f) \\ 0 & 0 & S(1,3,f) & 0 & 0 & S(2,3,f) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Nachdem man die Inertanzen I berechnet hat, kann eine dynamische Massenmatrix errechnet werden, indem man die Inertanz Matrix invertiert. Um die Kräfte im Betriebszustand zu erhalten, muss die errechnete dynamische Massenmatrix mit den Beschleunigungen im Betriebszustand multipliziert werden. Die Multiplikation der Kräfte mit den entsprechenden Frequenzgang-Funktionen erbringt die gesuchten Beiträge aller Körperschall-Quellen.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Bestimmung der Anteile einzelner Übertragungswege zum betriebsbedingten Gesamtgeräusch einer schallübertragenden Struktur, insbesondere eines Fahrzeuges, mit folgenden Schritten:
 - a) Definieren zumindest einer Schalleinleitungsposition in der schallübertragenden Struktur;
 - b) Applizieren zumindest eines Beschleunigungsaufnehmers und/oder zumindest eines Quellmikrophons im Bereich jeder Schalleinleitungsposition;
 - c) Definieren zumindest einer Empfangsposition;
 - d) Applizieren zumindest eines Zielmikrophons und/oder mindestens eines Beschleunigungsaufnehmers im Bereich der Empfangsposition;
 - e) Durchführen zumindest einer gleichzeitigen Messung des Schalldruckes und/oder der Beschleunigung an der Empfangsposition und der Beschleunigung und/oder des Schalldruckes an jeder Schalleinleitungsposition während des Betriebes;
 - f) Ermittlung zumindest einer Beschleunigung-zu-Druck- und/oder Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktion und/oder zumindest einer Druck-zu-Druck-Empfindlichkeitsfunktion auf Basis der Messung unter e);
 - g) Ermittlung von reziprok gemessenen Frequenzgangfunktionen zwischen jeder Schalleinleitungsposition und jeder Empfangsposition;
 - h) Ermittlung der Inertanzen im Betriebszustand, zumindest an einer Schalleinleitungsposition, auf der Basis der reziprok gemessenen Frequenzgangfunktionen und der Beschleunigung-zu-Druck- bzw. Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktionen;
 - i) Ermittlung zumindest einer Kraft an zumindest einer Schalleinleitungsposition auf Basis

der berechneten Inertanzen und der im Betrieb gemessenen Beschleunigungen an den Schalleinleitungspositionen.

- j) Ermittlung der Anteile der einzelnen Übertragungswege aufgrund der berechneten Kräfte und der reziprok gemessenen Frequenzgangfunktionen und/oder aufgrund der Druck-zu-Druck-Empfindlichkeitsfunktionen und/oder der im Betrieb gemessenen Schalldrücke an den Schalleinleitungspositionen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*, dass Schritt g) unmittelbar anschließend an die Schritte e) und f) durchgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, *dadurch gekennzeichnet*, dass zumindest eine Druck-zu-Druck-Empfindlichkeitsfunktion und/oder Druck-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktion für den gesamten Luftschall zwischen der Schalleinleitungsposition und der Empfangsposition ermittelt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, *dadurch gekennzeichnet*, dass auf der Basis der vorliegenden Druck-zu-Druck-Empfindlichkeits-Funktion und/oder Druck-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktion und des gemessenen Schalldruckes an den Schalleinleitungspositionen der Luftschall-Anteil und/oder der Beschleunigungs-Anteil am gesamten Schalldruck bzw. der gesamten Beschleunigung an der Empfangsposition ermittelt und vom gesamten Schalldruck bzw. der gesamten Beschleunigung an der Empfangsposition subtrahiert wird.
5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, *dadurch gekennzeichnet*, dass - für den Fall, dass keine Druck-zu-Druck-Empfindlichkeits-Funktion bzw. Druck-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktion für die Luftschall-Übertragung zwischen der Schalleinleitungsposition und der Empfangsposition vorliegt - die Druck-zu-Druck-Empfindlichkeits-Funktion bzw. Druck-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktion zusammen mit der Beschleunigung-zu-Schalldruck- bzw. Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeitsfunktion ermittelt wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Beschleunigung-zu-Druck- und/oder Beschleunigung-zu-Beschleunigung-Empfindlichkeit für jede Empfangsposition ermittelt und bei der Berechnung der Inertanzen berücksichtigt wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, *dadurch gekennzeichnet*, dass auf der Basis der ermittelten Inertanzen eine dynamische Massenmatrix errechnet wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, *dadurch gekennzeichnet*, dass auf der Basis der dynamischen Massenmatrix die an den Schalleinleitungspositionen auftretenden Kräfte im Betriebszustand berechnet werden.
9. Verfahren nach Anspruch 8, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Anteile der einzelnen Übertragungswege aller Körperschall-Quellen auf der Basis der Kräfte an den Schalleinleitungspositionen im Betriebszustand, sowie den entsprechenden Frequenzgang-Funktionen ermittelt werden.

Keine Zeichnung