

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
27. Dezember 2012 (27.12.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/175280 A2

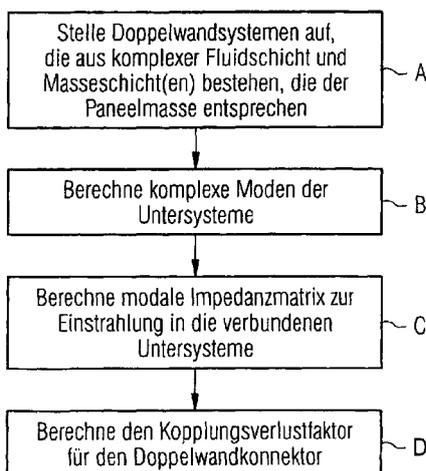
- (51) Internationale Patentklassifikation:
G01N 29/04 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/059704
- (22) Internationales Anmeldedatum:
24. Mai 2012 (24.05.2012)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2011 103 958.2 10. Juni 2011 (10.06.2011) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **EADS DEUTSCHLAND GMBH** [DE/DE]; Willy-Messerschmitt-Straße, 85521 Ottobrunn (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **PEIFFER, Alexander** [DE/DE]; Weißenburger Platz 1, 81667 München (DE).
- (74) Anwälte: **KASTEL, Stefan** et al.; Flügel Preissner Kastel Schober, Nymphenburger Strasse 20, 80335 München (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND APPARATUS FOR DETERMINING THE PASSAGE OF AUDIBLE SOUND ENERGY THROUGH A DOUBLE-WALL STRUCTURE

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DES DURCHGANGES AKUSTISCHER SCHALLENERGIE DURCH EINE DOPPELWANDSTRUKTUR

FIG 6



- A Set up double-wall systems which consist of complex fluid layer and mass layer(s) which correspond to the panel mass
- B Calculate complex modes for the subsystems
- C Calculate modal impedance matrix for radiation into the connected subsystems
- D Calculate the coupling loss factor for the double-wall structure

(57) Abstract: The invention relates to a method for determining the passage of audible sound energy through a double-wall structure which comprises a first wall, a second wall and a double-wall space in between. In order to take the double-wall effect into consideration with lower computational complexity and more precisely, the following steps are proposed: a) abstraction of the double-wall structure as a double-wall model by splitting into a plurality of subsystems which are formed from a volume of fluid representing the double-wall space and at least one mass layer which represents the walls, which adjoins the volume of fluid and which corresponds to the mass of the wall, b) calculation of the complex eigen modes for the subsystems, c) calculation of the modal impedance matrix for the introduction of sound into the connected subsystems, and d) calculation of the coupling loss factor for the double-wall structure.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung des Durchganges akustischer Schallenergie durch eine Doppelwandstruktur, die eine erste Wand, eine zweite Wand und einen Doppelwandraum dazwischen umfasst. Um den Doppelwandeffekt mit geringerem Rechenaufwand und genauer zu berücksichtigen werden die Schritte vorgeschlagen: a) Abstraktion der Doppelwandstruktur als Doppelwandmodell durch Aufteilung in mehrere Untersysteme, die aus einem den Doppelwandraum darstellenden Fluidvolumen und wenigstens einer einer der Wände darstellenden Masseschicht gebildet

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2012/175280 A2

CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung des Durchganges akustischer Schallenergie durch eine Doppelwandstruktur

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung des Durchganges akustischer Schallenergie durch eine Doppelwandstruktur.

10 Anwendung findet die Erfindung insbesondere auf dem Gebiet der Luftfahrt, um den Geräuschpegel in Kabinen von Luftfahrzeugen mit bestimmtem Rumpfaufbau zu ermitteln, um so bereits in der Konstruktionsphase auf die Geräuschentwicklung innerhalb der Kabine Einfluss nehmen zu können.

15 Luftfahrzeugkabinen sind häufig mit einer Außenwand und einer Innenwand sowie einem Raum dazwischen ausgestaltet. Für das Entwerfen von Luftfahrzeugen ist es vorteilhaft, ein Werkzeug in Händen zu haben, welches den Geräuschdurchgang oder das Schalldämm-Maß solcher Wandstrukturen bereits in der Entwurfsphase ermittelt.

20

Allgemein gesehen geht es bei der Erfindung um Akustikberechnung. Insbesondere geht es um Verfahren zur Berechnung des Kopplungsverlustfaktors zwischen Räumen. Der Kopplungsverlustfaktor gibt an, wie eine akustische Energiedichte in einem Raum mit einer akustischen Energiedichte in einem anderen Raum gekoppelt ist, wenn dazwischen die zu berechnende Konstruktion angeordnet ist.

25

Mit der Erfindung soll ein verbessertes Verfahren und eine verbesserte Vorrichtung zur Akustikberechnung von Doppelwänden zur Verfügung gestellt werden. Doppelwände sind insbesondere in der Luftfahrt, aber auch in der Schalldämmung weit verbreitet.

30

Mit dem Verfahren und der Vorrichtung soll ein Werkzeug geschaffen werden, die Doppelwände zu konstruieren und die akustische Durchgangsleistung zu bestimmen. Es sollen Vorhersagen möglich werden, wie laut es in einem der beiden durch die Doppelwände getrennten Räume wird. Eine besondere Größe, um die es hier geht, ist das Schalldämm-Maß.

In der Literatur sind bereits viele Ansätze zur Berechnung von Schalldämm-Maßen und Kopplungsverlustfaktoren durch Strukturen beschrieben worden.

10 Es wird hier auf die folgenden Literaturstellen Bezug genommen:

[1] A. Peiffer, S. Tewes, S. Brühl, SEA Modellierung von Doppelwandstrukturen, DAGA 2007

[2] Shorter, Langley, „On the reciprocity relationship between direct field radiation and diffuse reverberant loading“, JASA, 2004

15 [3] Shorter, Langley, „Vibro-Acoustic analysis of complex systems“, JSV

[4] W.R.Graham. Boundary Layer induced Noise in Aircraft, Part I: The flat Plate Model, J.Sound and Vibration, 192(1), 101-120, 1996

[5] US 6 090 147 A.

20 Die nachfolgende Beschreibung baut auf dem Wissen der vorliegenden Literaturstellen [1] bis [5] auf; es wird für weitere Einzelheiten zur Akustikberechnung ausdrücklich auf jede der oben genannten Literaturstellen [1] bis [5] verwiesen.

Das bisherige Verfahren zur Berechnung des Schallenergiedurchflusses durch Doppelwandstrukturen ist in der Literaturstelle [1] näher beschrieben. Hierzu wird bei Schallauffreffen unter einem bestimmten Winkel berechnet, welche Schallintensität beim Durchgang durch die Wand hinausgeht. Hierzu werden auftreffende Wellen unter allen möglichen Winkeln gemittelt.

Für alle typischen Seitenwandaufbauten in Hubschraubern und Flugzeugen dominiert der Doppelwandeffekt die Schallübertragung im Frequenzbereich zwischen 100 Hz bis 600 Hz.

- 5 Eine Doppelwand hat gegenüber einer Einfachwand mit gleichem Flächengewicht ein höheres Schalldämm-Maß. Dies lässt sich beispielsweise damit begründen, dass eine Luftschallwelle den Widerstand beim Übergang vom Medium Luft in das schwere und harte Medium Wand und wieder in das Medium Luft für jede Wand erneut überwinden muss. Dabei ist das Schalldämm-Maß nicht einfach durch eine
- 10 Addition der Schalldämm-Maße zweier Einfachwände erhältlich, da die Wände Rückwirkungen aufeinander haben. Diese Rückwirkungen sind abhängig von der jeweiligen Wellenlänge.

Dieser Doppelwandeffekt wird gemäß der Literatur [1] in der statistischen Energieanalyse (SEA) durch sogenannte Doppelwandkonnektoren berücksichtigt, deren

15 Berechnung mittels der Theorie der Transfermatrizen durchgeführt wird. Hierbei werden unendlich ausgedehnte Flächen angenommen. Verfahren und Vorrichtungen, die eine derartige Technik zur Akustikberechnung von Doppelwandstrukturen ermöglichen, sind in kommerziellen Produkten integriert, wie z.B. in dem kommerziell

20 erhältlichen Programm VAOne (ESI Group) oder das Open Source Project Open SEA. Der gesamte Stand der Technik und die bisherigen Verfahren und Vorrichtungen zur Berechnung von Doppelwandstrukturen basieren auf den Transfermatrixmethoden, wie sie in [1] erläutert sind.

- 25 Hierbei werden unendlich ausgedehnte Flächen angenommen. Dadurch werden Querresonanzen sehr ungenau berücksichtigt und die Vorhersagen der Simulation sind ungenau.

In den Literaturstellen [2] und [3] ist allgemein eine Technik zur Simulation akustischer

30 Strukturen durch hybride Verfahren erläutert. Dabei wird das zu simulieren-

de oder zu untersuchende System bezüglich eines vorhersagbaren Verhaltens deterministisch und bezüglich eines unsicheren Verhaltens statistisch betrachtet. Beispielsweise sind bestimmte Grenzflächen des akustischen Systems genau bekannt und auch vom akustischen Verhalten her gut berechenbar, während andere
5 Grenzbereiche des Systems nicht genau bekannt sind oder in nicht genau vorher-sagbarer Weise berechnet werden können, weswegen hierzu durchschnittliche Verhaltensweisen betrachtet werden.

Konkret lassen sich viele Modelle hinsichtlich der Anregung durch große Wellen-
10 längen relativ gut berechnen und vorhersagen, während die Anregung durch Wel-lenlängen, die klein im Verhältnis zu Systemflächen oder Verbindungen oft schwierig vorauszusagen sind. In den Verfahren und den Vorrichtungen zur Be-rechnung durch solche hybride Methoden werden daher sowohl deterministische Terme als auch statistische Terme eingesetzt. Zu genaueren Einzelheiten be-
15 züglich dieser hybriden Verfahren wird auf die Dokumente [2], [3], [5] verwiesen.

Ein Ansatz einer Verwendung eines hybriden Verfahrens zur Berechnung des a-kustischen Verhaltens einer durch Turbulenzen in der Luftgrenzschicht an der Au-ßenhaut angeregten Luftfahrzeugstruktur ist in [4] beschrieben. Dabei wird nur die
20 Außenwand als einzelne Platte mit Luftgrenzschicht betrachtet. Ziel bei der Litera-turstelle [4] war, eine Vorhersage der Geräuscentwicklung durch die Anregung der Außenhaut durch Luftturbulenzen zu ermöglichen.

Für Doppelwandstrukturen sind bisher nur die Transfermatrixmethoden möglich.
25

Nachteile der bekannten Verfahren zur Berechnung des akustischen Verhaltens von Doppelwänden sind der Rechenaufwand bei der Integration über die unter-schiedlichen Winkel, die Abstraktion der unendlich ausgedehnten Wand sowie die Unsicherheiten bezüglich der zu betrachtenden Auftreffwinkeln.
30

Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein insbesondere hinsichtlich erhöhter Schnelligkeit, verbesserter Genauigkeit und geringerem Rechenaufwand deutlich verbessertes Verfahren und eine entsprechende Vorrichtung zur Akustiksimulation von Doppelwänden zu schaffen.

5

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 sowie eine Vorrichtung gemäß dem Nebenanspruch gelöst.

Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche.

10

Die Erfindung schafft ein Verfahren zur Bestimmung des Durchganges akustischer Schallenergie durch eine Doppelwandstruktur, die eine erste Wand, eine zweite Wand und einen Doppelwandraum dazwischen umfasst, umfassend:

- a) Abstraktion der Doppelwandstruktur als Doppelwandmodell durch Aufteilung in mehrere Untersysteme, die aus einem den Doppelwandraum darstellenden Fluidvolumen und wenigstens einer eine der Wände darstellenden Masseschicht gebildet sind, die an das Fluidvolumen angrenzt und die der Masse der Wand entspricht,
- b) Berechnen der komplexen Eigenmoden für die Untersysteme,
- 15 c) Berechnen der modalen Impedanzmatrix für Schalleinleitung in die verbundenen Untersysteme und
- d) Berechnung des Kopplungsverlustfaktors für die Doppelwandstruktur.

20

Weiter schafft die Erfindung eine Vorrichtung zur Bestimmung des Durchganges akustischer Schallenergie durch eine Doppelwandstruktur, die eine erste Wand, eine zweite Wand und einen Doppelwandraum dazwischen umfasst, wobei die Vorrichtung umfasst:

25

- a) eine Abstraktionseinheit zur Abstraktion der Doppelwandstruktur als Doppelwandmodell durch Aufteilung in mehrere Untersysteme, die aus einem den Doppelwandraum darstellenden Fluidvolumen und wenigstens einer eine der Wände

30

darstellenden Masseschicht gebildet sind, die an das Fluidvolumen angrenzt und die der Masse der Wand entspricht,

b) eine Eigenmode-Berechnungseinheit zum Berechnen der komplexen Eigenmoden für die Untersysteme,

5 c) eine Impedanzmatrix-Berechnungseinheit zum Berechnen der modalen Impedanzmatrix für Schalleinleitung in die verbundenen Untersysteme und

d) eine Kopplungsverlustfaktorberechnungseinheit zum Berechnen des Kopplungsverlustfaktors für die Doppelwandstruktur.

10 Weiter schafft die Erfindung ein Computerprogrammprodukt mit Programmcodes, die bei Laden in einen Computer eine Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ermöglicht und so aus dem Computer ein Ausführungsbeispiel für die erfindungsgemäße Vorrichtung macht.

15 Bei einer besonders bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung werden die hybriden Verfahren für die Berechnung des Doppelwandkonnektors eingesetzt. Bevorzugt wird dabei ein analytisches Modell der Doppelwandkavität, deren Vorder- und Rückseite mit der jeweiligen Flächenmasse der Doppelwandschalen belegt ist, erstellt. Für dieses Modell wird mittels hybrider Verfahren die Schallübertragung
20 durch dieses System berechnet.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren wird die Schallübertragung durch die Doppelwand deutlich präziser beschrieben. Querresonanzen werden korrekt berücksichtigt.

25

Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung wird mittels hybrider Verfahren der Doppelwandkonnektor berechnet und dann der Energiedurchfluss durch die Doppelwand durch Verfahren der statistischen Energieanalyse mittels dieses so ermittelten Doppelwandkonnektors durchgeführt.

30

Vorzugsweise ist vorgesehen, dass wenigstens einer der Berechnungsschritte mittels hybrider Formulierung der Doppelwandstruktur oder der Untersysteme durchgeführt wird, wobei für größere Wellenlängen eine deterministische Bestimmungsmethode und für kleinere Wellenlänge eine statistische Bestimmungsmethode durchgeführt wird.

- In weiter bevorzugter Ausgestaltung ist vorgesehen, dass Schritt a) enthält:
- Erstellen eines ersten Untersystems, das aus der ersten Wand, dem Doppelwandraum und der zweiten Wand besteht,
 - 10 Erstellen eines zweiten Untersystems, das aus dem Doppelwandraum und der zweiten Wand besteht,
 - Erstellen eines dritten Untersystems, das aus der ersten Wand und dem Doppelwandraum besteht.
- 15 In einer bevorzugten Ausgestaltung ist vorgesehen, dass mittels der hybriden Formulierung der Energiedurchgang durch jedes des ersten bis dritten Untersystems bestimmt wird.

Vorzugsweise ist weiter vorgesehen, dass jede der Eigenmoden der Untersysteme als komplexe Eigenmode in einer Modalanalyse des gesamten Doppelwandmodells eingesetzt wird, um den Kopplungsverlustfaktor numerisch zu berechnen.

Vorzugsweise wird das Doppelwandmodell durch einfache Abstraktion der konkreten Doppelwandstruktur erhalten, wobei eine der Länge und Breite der Doppelwände entsprechende Länge bzw. Breite sowie eine entsprechende Tiefe wie bei 25 der konkreten Doppelwandstruktur angenommen werden. Als Masse für die Wände des Modells werden die Massen der Strukturwände angenommen.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigen:

- Fig. 1 eine typische Sektion eines Flugzeugs mit Beispielen für Doppelwandaufbauten;
- 5 Fig. 2 eine schematische Darstellung zur Verdeutlichung einer Abstraktion eines zu berechnenden Doppelwandaufbaus;
- Fig. 3 eine schematische Darstellung des abstrahierten Doppelwandaufbaus;
- 10 Fig. 4 eine schematische Darstellung zur Verdeutlichung der Abstraktion des Doppelwandaufbaus hinsichtlich der akustischen Pfade;
- Fig. 5 eine schematische Darstellung der einzelnen Untersysteme zur akustischen Simulation des Doppelwandaufbaus; und
- 15 Fig. 6 eine schematische Darstellung eines Flussdiagramms zur Berechnung des Kopplungsverlustfaktors des Doppelwandkonn timers.

20

In Fig. 1 ist der typische Aufbau eines Flugzeugrumpfsegmentes 10 als Beispiel eines Strukturelementes eines Luftfahrzeuges dargestellt. An dem Luftfahrzeugrumpf befinden sich mehrere Doppelwandstrukturen 12, die den Innenraum 14 des Passagiertraumes 16 von der Außenumgebung 18 und/oder einem Frachtraum 20 trennen.

25

Um abschätzen zu können, welcher Geräuschpegel bei einem bestimmten Entwurf eines Flugzeugrumpfes 10 in dem Innenraum 14 herrscht, ist es vorteilhaft, das Schalldämm-Maß für die Kabinenwände zu bestimmen.

30

Da die Kabinenwände die Doppelwandstrukturen 12 aufweisen, ist es hierzu notwendig, das Schalldämm-Maß der Doppelwandstrukturen 12 zu ermitteln. Dieses Schalldämm-Maß wird bei bestimmten Frequenzen wesentlich durch den Doppelwandeffekt beeinflusst.

5

Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, um den Kopplungsverlustfaktor der Doppelwandstrukturen 12 und damit das Schalldämm-Maß zu bestimmen.

Hierzu wird im Folgenden eine konkrete Doppelwandstruktur 12 aus dem Flugzeugrumpsegment 10 näher betrachtet, die in Fig. 2 skizziert dargestellt ist.

10

Die Doppelwandstruktur 12 hat eine Innenwand 22 mit einer Innenverkleidung 24 und eine Außenstruktur 26 mit einer Außenwand 28. Zwischen der Innenwand 22 und der Außenwand 28 ist ein inneres Volumen mit Dämmmaterial vorhanden.

15

Untersuchungen, die in der Literatur [4] erläutert sind, haben gezeigt, dass die Krümmung der realen Doppelwandstruktur 12 nur wenig Einfluss auf den akustischen Energiedurchfluss hat. Es wird daher zur Vereinfachung der realen Doppelwandstruktur 12 ein Doppelwandmodell 30 angenommen, wie es in Fig. 3 näher dargestellt ist. Das Doppelwandmodell 30 hat eine erste Wand 32, die die Innenwand 22 und die Innenverkleidung 24 repräsentiert, eine zweite Wand 34, die die Außenstruktur 26 mit der Außenwand 28 repräsentiert, und einen Doppelwandhohlraum 36 zwischen den beiden Wänden 32, 34, der das Innenvolumen mit dem Dämmmaterial repräsentiert.

20

25

Das Modell wird so aufgebaut, dass es dennoch die reale Doppelwandstruktur 12 abbildet. Hierzu wird erneut Bezug auf Fig. 2 genommen. Die Wände 32, 34 haben eine Länge l_x , welche der mittleren Länge l_x der gekrümmten Wände 22, 28 entlang der Krümmungslinie (in der Mitte zwischen den Wandstrukturen) ent-

spricht, und eine Breite l_y , die der Breite l_y der zu untersuchenden Doppelwandstruktur entspricht.

Weiter wird bei der realen Doppelwandstruktur 12 das Volumen V_0 des Raumes
 5 zwischen Innenwand 22 und Außenwand 28 bestimmt. In dem Doppelwandmodell
 30 wird dann als Tiefe t , d.h. als Abstand zwischen den Wänden 32, 34, der Wert t
 nach der folgenden Formel angenommen:

$$t = \frac{V_0}{l_x \cdot l_y}.$$

Alternativ wird konkret die reale Tiefe t der Doppelwandstruktur 12 herangezogen
 10 und daraus das Volumen $V_0 = l_x \cdot l_y \cdot t$ berechnet.

Weiter werden in dem Doppelwandmodell 30 die Massen der ersten Wand 32 und
 der zweiten Wand 34 als flächenbezogene Massenwerte angenommen, indem die
 Masse der Innenstruktur mit Innenwand 22 und Innenwand 24 durch die Fläche
 15 der Innenstruktur geteilt wird:

$$m_l' = \frac{m_l}{A_0}.$$

Dabei gilt: $A_0 = l_x \cdot l_y$.

20 Entsprechend wird die flächenbezogene Masse der zweiten Wand 34 durch Divi-
 sion der Masse der Außenstruktur durch deren Fläche repräsentiert:

$$m_s' = \frac{m_s}{A_0}.$$

Man erhält so das in Fig. 3 dargestellte Doppelwandmodell 30, wobei die erste
 25 Wand 32 die flächenbezogene Masse m_l' und die Dimension $l_y \times l_x$ hat, die zweite
 Wand 34 die flächenbezogene Masse m_s' und die Abmessungen $l_y \times l_x$ hat und

wobei als Abstand zwischen den Wänden 32, 34 die Tiefe t gemäß der obigen Formel angenommen worden ist. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit sowie die Dichte in den Wänden 32, 34 sowie dem Doppelwandhohlraum 36 werden gemäß der jeweiligen Materialauswahl für die reale Doppelwandstruktur 12 angenommen. Dabei wird der Doppelwandhohlraum 36 als fluidgefülltes Volumen (Fluidvolumen) betrachtet.

Dadurch erhält man ein sehr einfaches, aber doch zur Bestimmung des Schalldämm-Maßes durch die reale Doppelwandstruktur 12 gut geeignetes Doppelwandmodell 30, dessen akustisches Ansprechverhalten sich recht gut mit den folgenden Methoden berechnen lässt.

Mit dem Verfahren soll der Energiedurchfluss an Schwingungsenergie von einem Hohlraum mit einem akustischen Schwingungsfeld (diffuses Feld) durch die Doppelwandstruktur 12 in einen durch die Doppelwandstruktur 12 getrennten zweiten Hohlraum ermittelt werden. Konkret soll der Durchgang von akustischer Energie von der Außenumgebung 18 durch die Doppelwandstruktur 12 in dem Innenraum 14 ermittelt werden.

Wie in Fig. 3 angedeutet, bildet die Außenumgebung 18 demnach einen sendenden Hohlraum 38 und der Innenraum 14 bildet einen empfangenden Hohlraum 40, wobei die akustische Energie durch die Doppelwandstruktur 12 hindurchgeht.

Betrachtet man das Doppelwandmodell 30 gemäß Fig. 3, so ist klar, dass hierbei die beiden Wände 32, 34 angeregt werden, aber dass auch die Wände 32, 34 untereinander beeinflussen. Es gibt somit ganz unterschiedliche Eigenformen oder auch Eigenmoden die durch die unterschiedlichen Grenzflächen bestimmt werden.

Um die Eigenmoden des Doppelwandmodells 30 genauer als bisher mit geringem Rechenaufwand zu bestimmen, wird das System des Doppelwandmodells 30

weiter abstrahiert, indem es in mehrere Untersysteme aufgeteilt wird, die im Folgenden anhand der Darstellung in den Fig. 4 und 5 näher erläutert werden.

5 Fig. 4 stellt schematisch Untersysteme für eine SEA-Methode und diesbezügliche resonante und nicht-resonante Pfade dar.

Gemäß Fig. 4 gibt es einen ersten Pfad 1 eines direkten Durchgangs durch das Doppelwandmodell 30, wobei die durch die beiden Wände 32, 34 und dem Doppelwandhohlraum 36 bestimmten Eigenmoden vorherrschend sind. Weiter gibt es
10 einen mit 2 gekennzeichneten zweiten Pfad, wo Schwingungen der ersten Wand 32 in den empfangenden Hohlraum übertragen werden. Weiter gibt es den mit 3 gekennzeichneten dritten Pfad, wo die zweite Wand 34 durch den sendenden Hohlraum 38 angeregt wird.

15 Demnach werden die in Fig. 4 näher dargestellten Untersysteme 1, 2 und 3 aufgestellt, wobei das erste Untersystem 1 aus der ersten Wand 32, der zweiten Wand 34 und dem Doppelwandhohlraum 36 dazwischen gebildet ist, das zweite Untersystem 2 aus der ersten Wand 32 und dem Doppelwandhohlraum 36 gebildet ist und das dritte Untersystem 3 aus der zweiten Wand 34 und dem Doppelwandhohlraum 36 gebildet ist.
20

Der Doppelwandhohlraum 36 wird als komplexe Fluidschicht angenommen, und die Wände 32, 34 werden als Massenschichten entsprechend der Paneelmasse der realen Doppelwandstruktur 12 angenommen.
25

Das Verfahren zur Berechnung des Kopplungsverlustfaktors der realen Doppelwandstruktur 12 lässt sich anhand der Darstellung in dem Flussdiagramm von Fig. 6 wie folgt erläutern:

Zunächst werden die in Fig. 5 dargestellten drei Untersysteme, die aus komplexem Fluid und Massenschicht bestehen, gebildet (Schritt A).

5 Anschließend werden die komplexen Eigenmoden für jedes Untersystem berechnet (Schritt B).

Zur Berechnung dieser komplexen Eigenmethoden werden hybride Verfahren eingesetzt, wie sie genau in [3] und [5] beschrieben sind. Es werden demnach beispielsweise für größere Wellenlängen deterministische Verfahren, wie die Methode der Finiten Elemente, und für kleinere Wellenlängen statistische Verfahren, wie
10 z.B. die statistische Energieanalyse, eingesetzt. Die konkreten Berechnungsmethoden sind genau in [3] und [5] beschrieben. Für den konkreten Fall des Schalldurchgangs durch Wandstrukturen wurde das Verfahren auch bereits früher in [4] in der Literatur beschrieben. Entsprechend nach diesen Verfahren arbeitende
15 Software ist auf dem Markt erhältlich, z.B. VAOne der Firma ESI Group (ehemals von der Fa. Vibro-Acoustics). Mit den komplexen Eigenmoden lässt sich die modale Impedanzmatrix zur Strahlung in die miteinander verbundenen Untersysteme berechnen (Schritt C).

20 Damit lässt sich der Kopplungsverlustfaktor des Doppelwandkonnektors berechnen.

Der Doppelwandkonnektor lässt sich so entsprechend auf einfache Art und Weise berücksichtigen.

25 Mit dem so ermittelten Doppelwandkonnektor lässt sich konkret eine SEA durchführen, ähnlich wie bei [1], jedoch mit genauerem Doppelwandkonnektor.

Konkret wird mit dem in Fig. 3 dargestellten Doppelwandmodell 30, welches konkret eine Abstraktion der realen Doppelwandstruktur 12 darstellt, sich aber dennoch recht leicht berechnen lässt, eine analytische Modalanalyse durchgeführt.

- 5 Bei dem hier in Rede stehenden Verfahren wird die Doppelwand abstrahiert. Es werden weiche Massen angenommen und ein Luftvolumen dazwischen, um den Kopplungsverlustfaktor zu berechnen.

10 Wie in Fig. 2 dargestellt, wird zur Abstraktion ein gekrümmtes Flugzeugelement mit zwei Spanten 42, 44, einem Zwischenvolumen V_0 und einem „lining“ (Innenverkleidung 24) zu dem in Fig. 3 dargestellten Doppelwandmodell 30 abstrahiert. Hierzu wird an dem ersten Spant 42 die mittlere Spantlänge l_x genommen, die Breite l_y und die Tiefe t . Dies ergibt das abstrahierte Volumen V_0 . Die Massen sind ähnlich leicht abstrahierbar. Man nimmt einfach die Masse der äußeren Struktur
15 und die Masse der inneren Struktur und normiert oder mittelt diese auf die entsprechenden Flächen. Aus diesen Werten bildet man dann das in Fig. 3 dargestellte rechteckige System mit den entsprechenden Dicken der Wände 32, 34 und des Doppelwandhohlraums 36.

- 20 Bei dem Verfahren werden hybride Verfahren für die Berechnung des Doppelwandkonnektors verwendet. Hierzu wird das in Fig. 3 dargestellte analytische Modell der Doppelwandkavität – Doppelwandhohlraum 36 –, deren Vorderseite und Rückseite mit der jeweiligen Flächenmasse der Doppelwandschalen belegt ist, erstellt. Für dieses Doppelwandmodell 30 wird mittels der bekannten hybriden Ver-
25 fahren die Schallübertragung durch dieses System berechnet.

Bei der akustischen Simulation von Doppelwänden ist der Doppelwandeffekt für einen breiten Frequenzbereich dominant. Dieser Frequenzbereich beginnt etwa bei der Doppelwandresonanz von etwa 100 Hz.

30

Man könnte diesen Effekt durch die deterministische Methode der Finiten Elemente berechnen, bei der das gesamte System der Doppelwand in kleine Elemente aufgeteilt wird. Aufgrund des großen Rechenaufwandes ist dieses Verfahren jedoch auf kleinere Untersysteme beschränkt. Ein alternatives Verfahren wäre das
5 sogenannte SEA-Verfahren. Hierbei wird der Doppelwandeffekt unter Verwendung einer analytischen Formulierung berücksichtigt. Bisher erfolgt diese Formulierung allein auf Basis von Transfermatrixmethoden, die unendliche Schichten von Massen und Fluid einsetzen. Die letztendliche Übertragung von Energie wird durch Mittelung über bestimmte Einfallswinkel erhalten. Der Nachteil dieses Verfahrens
10 ist, dass es für Doppelwände realistischer Größe nicht funktioniert und dass es keine gültige Grundregel zur Auswahl des Winkelbereichs zur Mittelung gibt.

Bei dem hier vorgeschlagenen neuen Verfahren werden diese Probleme überwunden.

15

Allgemein ist das physikalische System, welches hinter dem Doppelwandkonnector steckt, ein System konzentrierte Masse – Hohlraum – konzentrierte Masse. Bei dem Verfahren werden nun die komplexen Eigenmoden dieses Untersystems berechnet, wobei die hybriden Verfahren, die aus [3], [4] und [5] bekannt sind, verwendet werden, um den Energiedurchfluss durch die jeweiligen Verbindungen
20 dieses Systems zu berechnen. Die Energieflusspfade, die dabei berücksichtigt werden, sind in Fig. 4 dargestellt und mit 1, 2 und 3 bezeichnet. Jeder Pfad 1, 2, 3 wird durch komplexe Moden des Untersystems Hohlraum – konzentrierte Deckwände beschrieben. Die konzentrierten Massen oder Deckwände werden dabei
25 als Membrane ohne Spannung oder Biegesteifigkeit angesehen.

Unter Verwendung eines solchen einfachen Modells mit einfachen Untersystemen werden entsprechende komplexe Eigenmoden dieser Untersysteme erhalten, mit denen der Kopplungsverlustfaktor numerisch im Wege einer Modalanalyse be-

rechnet werden kann. Die Genauigkeit ist viel größer als diejenige mit der Transfermatrixmethode.

Das Verfahren berücksichtigt alle lokalen Resonanzen des Doppelwandsystems.

- 5 Es wird keine Mittelung über Winkel oder dergleichen benötigt. Dies macht es viel einfacher, den Doppelwandeffekt korrekt bei der Berechnung des akustischen Verhaltens der realen Doppelwandstruktur 12 zu berücksichtigen.

- 10 Insgesamt wird ein Verfahren zur hybriden Formulierung des Doppelwandkonnektors in der statistischen Energieanalyse erhalten.

- Die entsprechenden Schritte können in Software implementiert werden und, eventuell zusammen mit bekannten Programmcodes zur Durchführung der hybriden Verfahren, auf einem Computerprogrammprodukt gespeichert werden. Z.B. können die Subsysteme in die Software für Hybridverfahren eingegeben werden. 15 Allerdings wäre bei derzeit existierender Software noch künstlich ein Modell, zum Beispiel ein FE-Modell, mit den entsprechenden Eigenschaften zu erstellen.

- 20 Durch Laden eines solchen Programms oder entsprechende Programmierung lässt sich ein Computer zu einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens gestalten.

Bezugszeichenliste:

- 10 Flugzeugrumpfsegment
- 12 Doppelwandstruktur
- 14 Innenraum
- 5 16 Passagierraum
- 18 Außenumgebung
- 20 Frachtraum
- 22 Innenwand
- 24 Innenverkleidung
- 10 26 Außenstruktur
- 28 Außenwand
- 30 Doppelwandmodell
- 32 erste Wand
- 34 zweite Wand
- 15 36 Doppelwandhohlraum (Double wall cavity; DW cavity)
- 38 sendender Hohlraum (Sending Cavity)
- 40 empfangender Hohlraum (Receiving Cavity)
- 42 erster Spant
- 44 zweiter Spant
- 20 V_0 Zwischenvolumen
- A Stelle Doppelwandssystemen auf, die aus komplexer Fluidschicht und Masse-
schicht(en) bestehen, die der Paneelmasse entsprechen
- B Berechne komplexe Moden der Untersysteme
- C Berechne modale Impedanzmatrix zur Einstrahlung in die verbundenen Un-
tersysteme
- 25 D Berechne den Kopplungsverlustfaktor für den Doppelwandkonnektor

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung des Durchganges akustischer Schallenergie durch eine Doppelwandstruktur, die eine erste Wand, eine zweite Wand und einen Doppelwandraum dazwischen umfasst, umfassend:
 - a) Abstraktion der Doppelwandstruktur als Doppelwandmodell durch Aufteilung in mehrere Untersysteme, die aus einem den Doppelwandraum darstellenden Fluidvolumen und wenigstens einer eine der Wände darstellenden Masseschicht gebildet sind, die an das Fluidvolumen angrenzt und die der Masse der Wand entspricht,
 - b) Berechnen der komplexen Eigenmoden für die Untersysteme,
 - c) Berechnen der modalen Impedanzmatrix für Schalleinleitung in die verbundenen Untersysteme und
 - d) Berechnung des Kopplungsverlustfaktors für die Doppelwandstruktur.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens einer der Berechnungsschritte mittels hybrider Formulierung der Doppelwandstruktur oder der Untersysteme durchgeführt wird, wobei für größere Wellenlängen eine deterministische Bestimmungsmethode und für kleinere Wellenlänge eine statistische Bestimmungsmethode durchgeführt wird.
3. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Schritt a) enthält:
 - Erstellen eines ersten Untersystems, das aus der ersten Wand, dem Doppelwandraum und der zweiten Wand besteht,
 - Erstellen eines zweiten Untersystems, das aus dem Doppelwandraum und der zweiten Wand besteht,

Erstellen eines dritten Untersystems, das aus der ersten Wand und dem Doppelwandraum besteht.

4. Verfahren nach Anspruch 2 und nach Anspruch 3,
5 dadurch gekennzeichnet,
dass mittels der hybriden Formulierung der Energiedurchgang durch jedes des ersten bis dritten Untersystems bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,
10 dadurch gekennzeichnet,
dass jede der Eigenmoden der Untersysteme als komplexe Eigenmode in einer Modalanalyse des gesamten Doppelwandmodells eingesetzt wird, um den Koppelungsverlustfaktor numerisch zu berechnen.

- 15 6. Computerprogrammprodukt, das in einen Computer geladen werden kann und das Proqramcodes enthält, um das Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche auf dem Computer durchzuführen.

7. Vorrichtung zur Bestimmung des Durchganges akustischer Schallenergie
20 durch eine Doppelwandstruktur, die eine erste Wand, eine zweite Wand und einen Doppelwandraum dazwischen umfasst, wobei die Vorrichtung umfasst:
 - a) eine Abstraktionseinheit zur Abstraktion der Doppelwandstruktur als Doppelwandmodell durch Aufteilung in mehrere Untersysteme, die aus einem den Doppelwandraum darstellenden Fluidvolumen und wenigstens einer eine der Wände
25 darstellenden Masseschicht gebildet sind, die an das Fluidvolumen angrenzt und die der Masse der Wand entspricht,
 - b) eine Eigenmode-Berechnungseinheit zum Berechnen der komplexen Eigenmoden für die Untersysteme,
 - c) eine Impedanzmatrix-Berechnungseinheit zum Berechnen der modalen Im-
30 pedanzmatrix für Schalleinleitung in die verbundenen Untersysteme und

- d) eine Kopplungsverlustfaktorberechnungseinheit zum Berechnen des Kopplungsverlustfaktors für die Doppelwandstruktur.

FIG 1

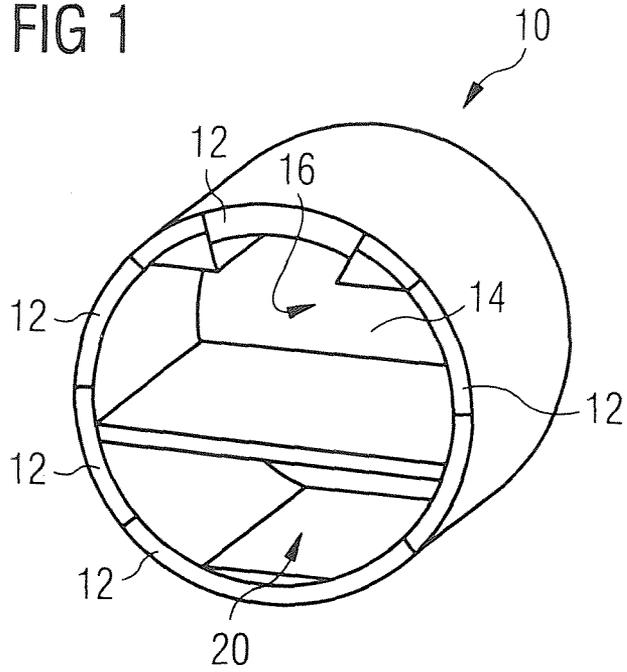


FIG 2

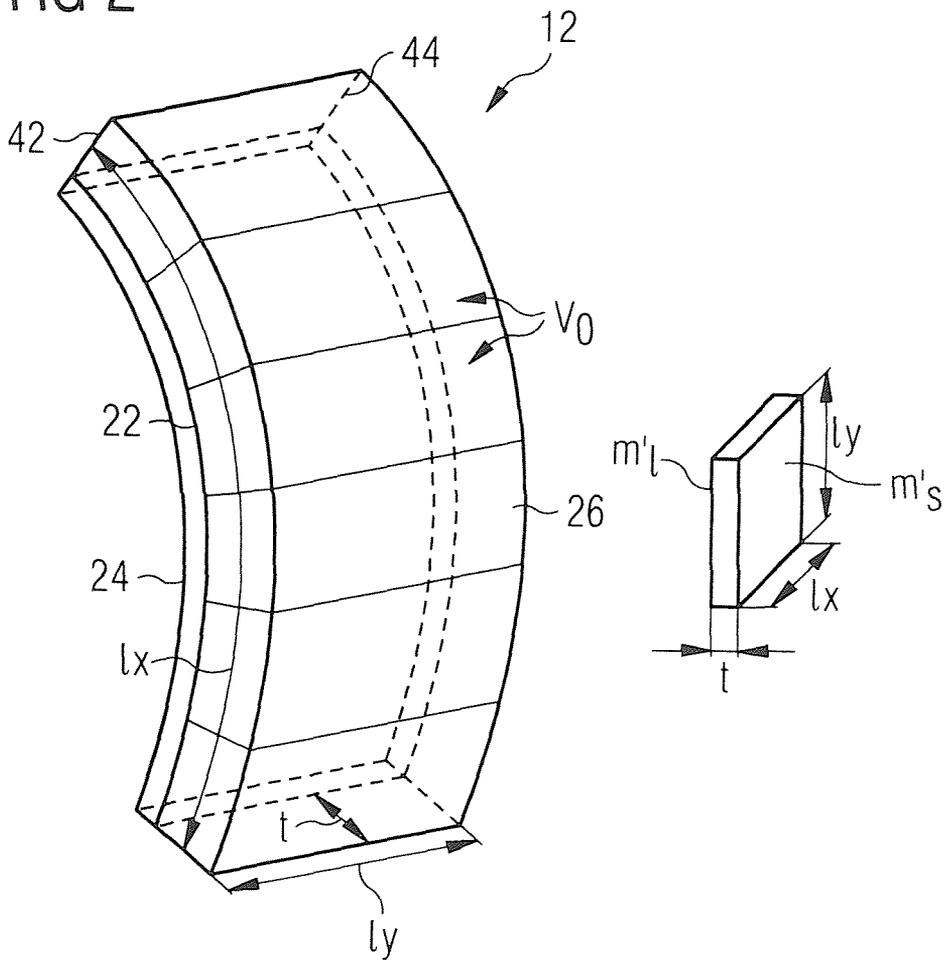


FIG 3

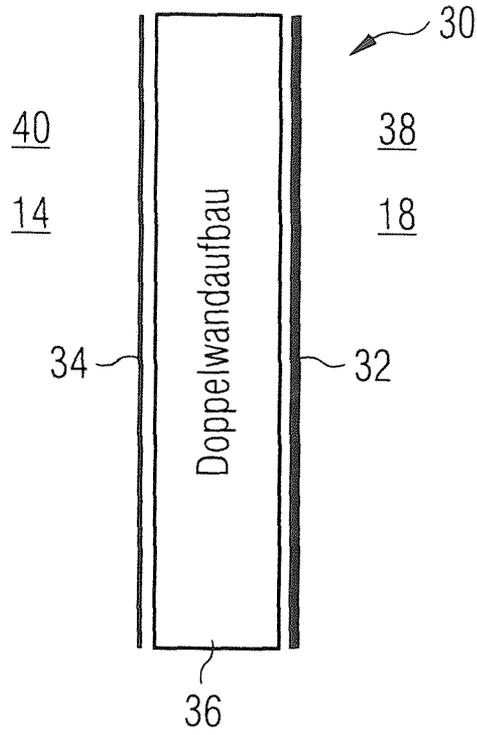


FIG 4

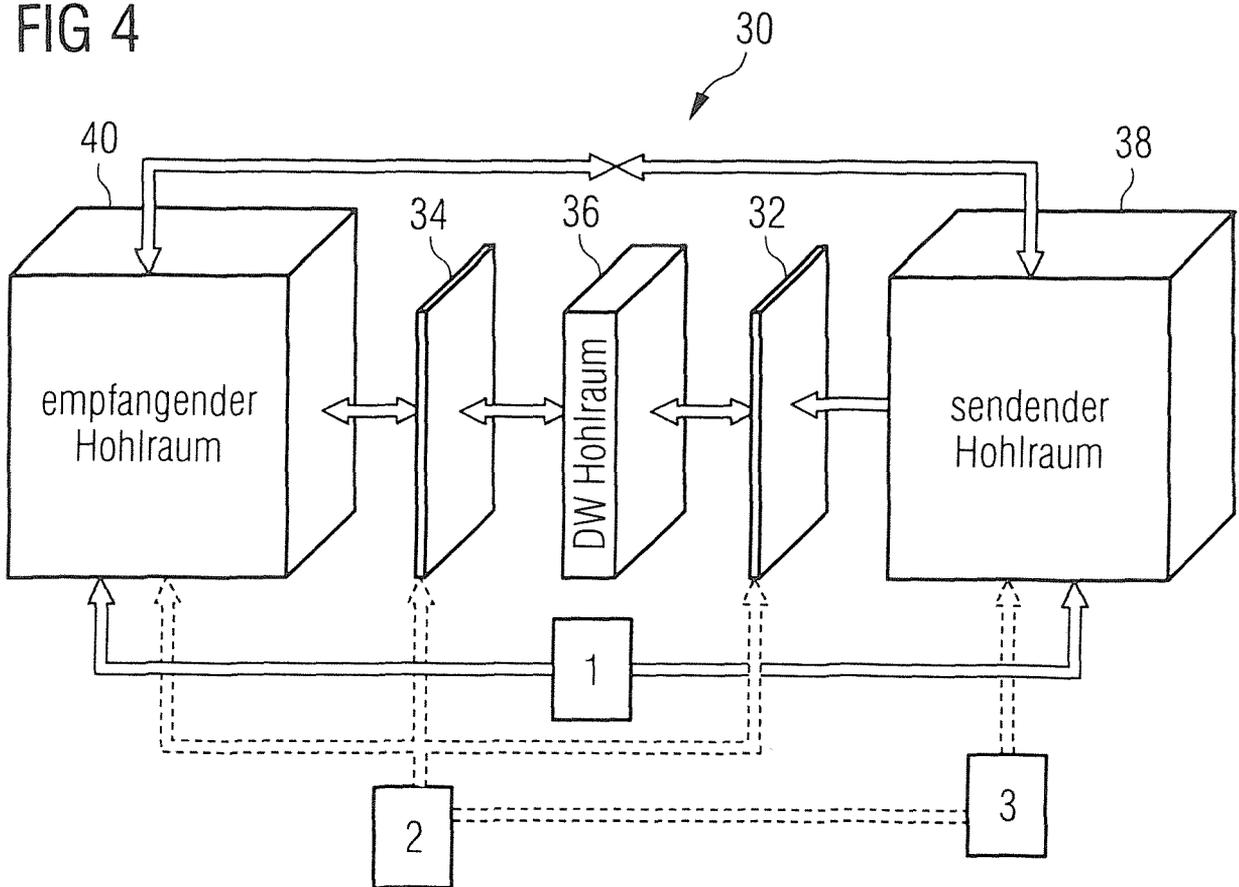


FIG 5

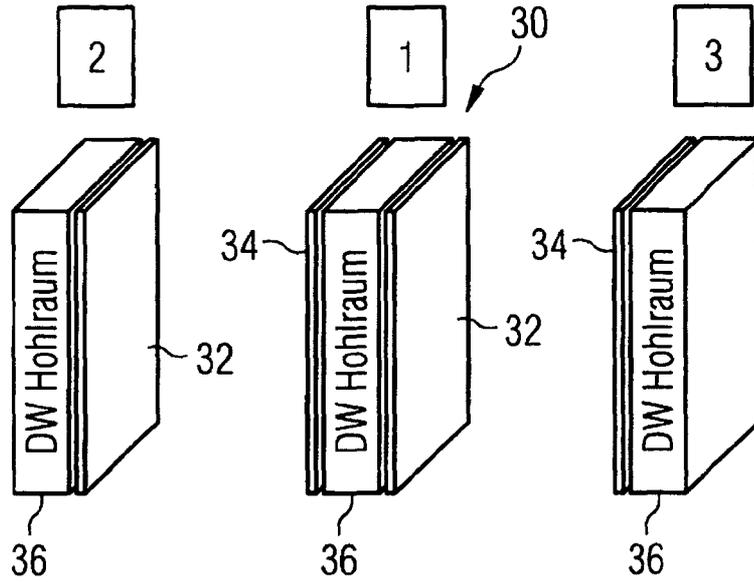
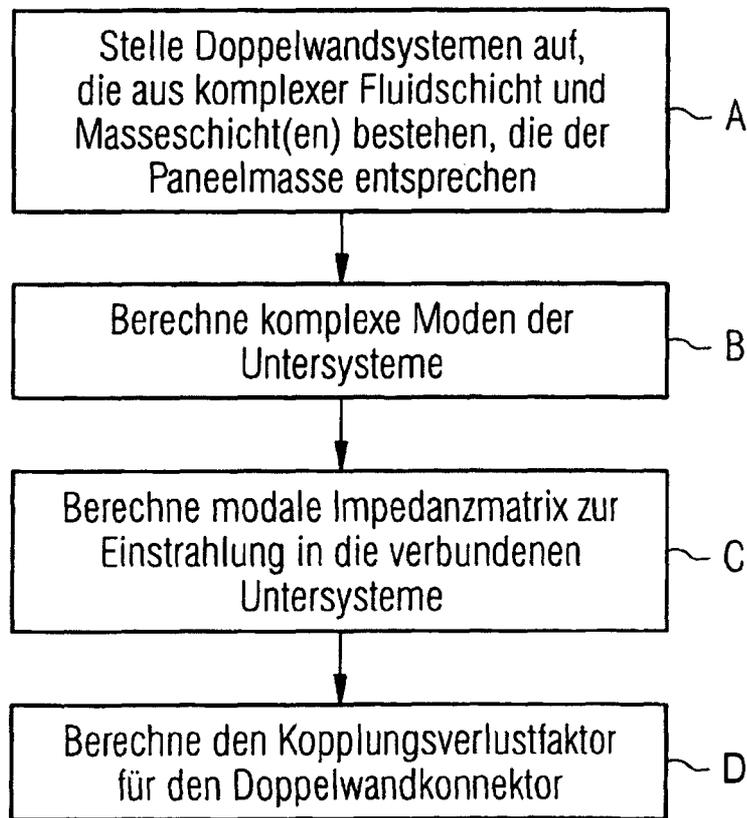


FIG 6



- A... Set up double-wall systems which consist of complex fluid layer and mass layer(s) which correspond to the panel mass
- B... Calculate complex modes for the subsystems
- C... Calculate modal impedance matrix for radiation into the connected subsystems
- D... Calculate the coupling loss factor for the double-wall structure

- A... Établissement des systèmes à double paroi formés d'une couche fluide complexe et de couche(s) de masse correspondant à la masse du panneau
- B... Calcul des modes complexes des sous-systèmes
- C... Calcul de la matrice d'impédance modale pour l'irradiation dans les sous-systèmes reliés
- D... Calcul du facteur de perte de couplage pour le connecteur de la double paroi