(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 3 716 264 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
30.09.2020 Patentblatt 2020/40

(51) Int Cl.:
G10K 11/172 *(2006.01)* ***G10K 11/168*** *(2006.01)*
E04B 1/82 *(2006.01)*

(21) Anmeldenummer: **20000124.6**

(22) Anmeldetag: **23.03.2020**

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

(30) Priorität: **26.03.2019 DE 102019002157**

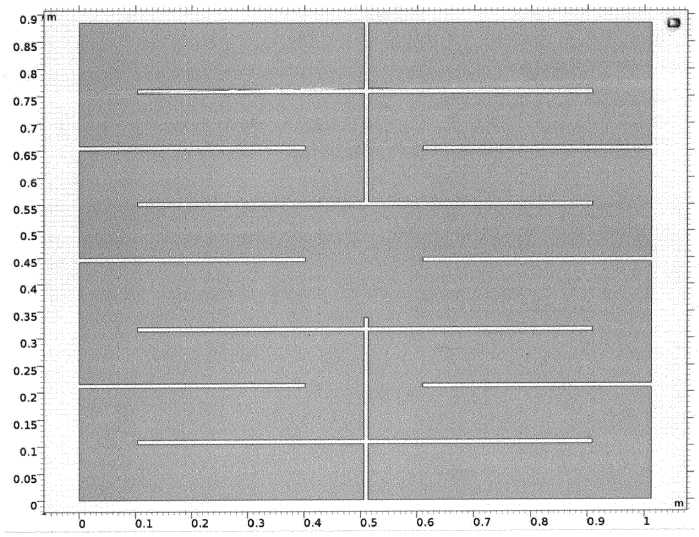
(71) Anmelder:
- **Gernert, Stefanie**
  22767 Hamburg (DE)
- **Mischo, Johannes**
  23883 Seedorf (DE)

(72) Erfinder:
- **Gernert, Stefanie**
  22767 Hamburg (DE)
- **Mischo, Johannes**
  23883 Seedorf (DE)

(54) **WAND ZUR TIEFFREQUENTEN UND BREIT-FREQUENZBANDIGEN; MASSIVEN SCHALLDÄMPFUNG FLÄCHIG EINFALLENDEN SCHALLS**

(57) Die Erfindung ist eine Wand zur tieffrequenten und breit-frequenzbandigen, massiven Schalldämpfung flächig einfallenden Schalls. Sie bewegt sich im Gebiet der Schallabsorption in und zwischen Räumen, dem Schallschutz im Außenbereich, sowie der Raumakustik. Die Erfindung verwendet das Prinzip der akustischen Metamaterialien. Diese sind durch Geometrien gekennzeichnet, welche aus Einzelelementen bestehen, deren einzelnen Längen und Größen im Sub-Wellenlängenbereich der einfallenden Schallwelle liegen, und dadurch eine massive, tieffrequente und breitbandige Dämpfung des Schalls erreichen. Hierfür werden in der Wand Hohlräume als Labyrinthstrukturen verwendet, deren Labyrinthgänge sich derart komplex zusammensetzen, dass ein Gangende zu mehreren Gangenden offen ist. Die Labyrinthgänge sind außerdem derart zusammengefügt, daß das gesamte Labyrinth einen einzigen Luftraum bildet (siehe Zeichnung 1). Hier spielt das Baumaterial keine akustische Rolle und kann daher beliebig gewählt werden.

Zeichnung 1:



EP 3 716 264 A1

Beschreibung

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0001] Wand zur massiven, breitbandigen, spektral ausgeglichenen und sehr tieffrequenten Schallabsorption von auf die Wand auftreffenden Luftschalls, mittels sub-wellenlängiger metamaterialartiger Labyrinthstruktur als Luftraum innerhalb der Wand, wobei die Labyrinthstruktur einen einzigen geschlossenen Luftraum darstellt, und bei der mehrere Labyrinthgänge an ihren Enden zu mehreren benachbarten Labyrinthgängen offen sind.

GEBIET DER ERFINDUNG

[0002] Die Erfindung ist auf dem Gebiet der Schalldämpfung durch Wände, unter Zuhilfenahme von Methoden der Metamaterialien, i.e. komplexer Geometrien mit weitgehender Unabhängigkeit des verwendeten Baumaterials.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0003] Schalldämpfende Wände sind bisher meist gut in der Lage, hohe Frequenzen mit einem Absorptionsgrad von über A = 0.9 zu dämpfen, wobei ein Absorptionsgrad von A = 1 eine völlige Absorption und A = 0 keine Absorption bedeutet. Schwierig allerdings ist die Dämpfung tiefer Frequenzen. Daraus folgt auch ein stark frequenzabhängiges Dämpfungsverhalten vieler schalldämpfender Bauten, wobei Bässe, Mitten oder Höhen unterschiedlich stark bedämpft werden. Eine Dämpfung, die über den gesamten Hörbereich (etwa 20 Hz - 20 kHz) gleichmäßig verläuft ist jedoch oft wünschenswert.

[0004] Dämpfung wird bei bisher existierenden schalldämpfenden Bauten meist durch eine Wand realisiert, welche schallabsorbierende Materialeigenschaften hat. Hierzu gehört zuerst die innere Dämpfung des Materials, welche sich aus viskoelastischer Dämpfung, thermischer Dämpfung, sowie weiteren Dämpfungsarten zusammensetzt (siehe z.B. X.Q. Zhou, D.Y. Yu, X.Y. Shao, S.Q. Zhang & S. Wang: "Research and applications of viscoelastic vibration damping materials: A review, In: Composite Structures, Vol. 135, pp. 460-480, 2016). Alle hier vorkommenden Prozesse, die zur inneren Dämpfung führen sind bis heute nicht vollständig erforscht (siehe hierzu A. Pierce, Intrinsic damping, relaxation processes, and internal friction in vibrating systems, POMA, Vol. 9, 1-16, 2010). Die drei hauptsächlich benutzen Materialien sind Bitumen, Sandwich-Strukturen sowie Nanofäden. Die Konstruktion dieser Materialien ist meist sehr aufwendig und kostspielig. Außerdem ist die Dämpfung von tiefen Frequenzen durch diese Materialien nur sehr gering, und damit meist viel geringer als die Dämpfung der hohen Frequenzen. Somit ist das Dämpfungsspektrum stark frequenzabhängig.

[0005] Auch werden Räume zur Dämpfung von Schall verwendet. Zur Dämpfung von Bässen werden sogenannte Bassfallen eingesetzt. Dies sind meist Zwischenräume zwischen einer Außenwand eines Raumes und einer zweiten Wand, die vor diese Außenwand angebracht wird, so daß ein neuer Raum entsteht. Dieser Raum hat Eigenresonanzen im Bassbereich, welche tiefe Frequenzen aufnehmen und ausdämpfen sollen. Diese Konstruktion benötigt viel Platz, da der Raum der Bassfalle dem eigentlichen Nutzraum entzogen wird. Auch ist die Konstruktion von zwei Wänden anstatt nur einer konstenintensiv.

[0006] Hohe Frequenzen werden ebenfalls durch Räume gedämpft, indem in Strukturplatten in regelmäßigen Abständen von wenigen Zentimetern in einem Gatter Bohrungen in die Platte vorgenommen werden. Die so präparierte Platte dämpft Schall durch eine Verwirbelung der Schallschnelle an den Löchern, wobei die turbulente Dämpfung den Schall in thermische Energie überführt. Diese Dämpfungsart ist auf hohe Frequenzen beschränkt, und dient hauptsächlich der Dämpfung dieser hohen Frequenzen bei Reflexionen von Schall in den Raum, oft zur besseren Sprachverständlichkeit in Vortragssälen oder Konferenzräumen.

[0007] Die in der vorliegenden Patentschrift dargestellte Erfindung einer schalldämpfenden Metamaterialwand dämpft Schall im Gegensatz zu bisherigen Konstruktionen gleichmäßig breitbandig, also über den gesamten hörbaren Frequenzbereich (etwa 20 Hz - 20 kHz) mit etwa gleich hohem Dämpfungsgrad (ca. 50 dB - 70 dB Schallabsorption).

[0008] Dies wird realisiert durch eine komplexe geometrische Struktur eines Metamaterials. Metamaterialien sind Bauten, die komplexe Geometrien aufweisen und so akustische Eigenschaften besitzen, die herkömmliche, in der Natur vorkommende oder bisher konstruierte Materialien nicht haben, wie etwa negative Dichte oder negative Steifigkeit (siehe z.B. M.R. Haberman and A.N. Norris, Acoustic Metamaterials, In: Acoustics Today 12 (3), 31-39, 2016). Diese führen u.a. zu einem negativen Brechungsindex, was akustische Linsen ermöglicht, wobei eine auf einen Gegenstand eintreffende Welle von diesem Gegenstand derart gestreut wird, daß die den Gegenstand verlassende Welle hinter dem Gegenstand auf einen Fokuspunkt zuläuft. Auch können diese Metamaterialien als Versteck zu funktionieren (cloaking), indem eine von einem Emissionsort auf ein Metamaterial eintreffende Welle durch dieses Metamaterial derart gestreut wird, das die das Metamaterial verlassende Welle an einem Immissionsort einer Welle gleicht, die vorhanden wäre, wenn kein Gegenstand zwischen Emissions- und Immissionsort vorhanden wäre. Eine weitere Eigenschaft von Meta-

materialien ist deren erhebliche Dämpfung. Diese Eigenschaft der stark erhöhten Dämpfung macht sich die vorliegende Erfindung zu Nutze.

[0009] Diese Eigenschaften werden durch Strukturen ermöglicht, die im Sub-Wellenlängenbereich liegen, also Strukturen, deren Länge oder Durchmesser erheblich kleiner sind als die Wellenlänge, die manipuliert wird. Ein solcher Sub-Wellenlängenbereich kann dabei zwischen etwa ein Zehntel bis zu einem Tausendstel der Wellenlänge der zu manipulierenden Schallwelle liegen. Das Metamaterial besteht hierbei aus einer großen Anzahl solcher Strukturen, die alle im Größenbereich des oben beschriebenen Sub-Wellenlängenbereichs liegen, wodurch der Effekt des Metamaterials erzeugt wird.

All diese Eigenschaften haben Metamaterialien meist nur für einzelne Frequenzen, für welche diese Materialien gebaut wurden. Eine komplexe Struktur mit Einzelelementen im Sub-Wellenlängenbereich, mit welcher Dämpfung erzielt werden soll, erreicht diese Dämpfung daher meist nur für eine einzelne Frequenz und ist somit nicht breitbandig. Dies gilt auch für die anderen Eigenschaften wie etwa das Verstecken oder die akustische Linse.

[0010] Die in dieser Patentschrift vorgestellte Erfindung ist ein Metamaterial, allerdings wirkt dies breitbandig über dem gesamten hörbaren Frequenzbereich (ca. 20 Hz - 20 kHz). Des Weiteren ist diese Dämpfung über diesen Frequenzbereich in etwa gleich groß, so daß Bässe, Mitten und Höhen im Frequenzspektrum etwa gleich stark bedämpft werden. Auch ist die vorgestellte Erfindung eine Wand in der Größe und Stärke einer herkömmlichen Wand, so daß sie nicht mehr Raum oder Platz in Anspruch nimmt, wie es etwa bei einer Bassfalle der Fall ist, die vom Nutzraum einen Raum abspalten muß. Auch ist die Konstruktion der Wand nicht sehr aufwendig und deren Verhalten nicht abhängig vom verwendeten Baumaterial (Beton, Holz, Rigips, etc.). Sie ist somit kostengünstig baubar, und genügt den für den Bau von Gebäuden erforderlichen statischen Anforderungen.

BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0011] Die Erfindung ist eine Wand zur breitbandigen, hocheffizienten Schallabsorption über den gesamten hörbaren Frequenzbereich von Luftschall (ca. 20 Hz - 20 kHz). Diese Wand besteht aus einer geschlossenen Vorder- und Rückseite. Der Innenraum besteht aus einem Luftraum, in welches ein Labyrinth eingebaut ist. Jeder Labyrinthgang hat eine Länge, die im Sub-Wellenlängenbereich des tiefen Bassbereichs, um 20 Hz - 60 Hz liegt, also erheblich kürzer ist als die Wellenlänge dieser Bassfrequenzen. Die einzelnen Labyrinthgänge sind hierbei gegeneinander offen, so daß der akustischen Eigenwert (als Lösung der Eigenwert-Differentialgleichung für Luftschall, auch Helmholtz-Gleichung genannt und weiter unten auf S. 5 dieser Schrift beschrieben), des gesamten Labyrinths im tiefen Bassbereich des menschlichen Hörens (ca. 20 Hz - 60 Hz) liegt.

[0012] Das Labyrinth der Wand ist so gebaut, daß jeder einzelne Labyrinthgang mindestens an einem Ende zu einem benachbarten Labyrinthgang über die gesamte Labyrinthgangquerschnittsfläche offen ist. So stellt das Labyrinth einen einzigen geschlossenen Luftraum dar. Zur Erreichung einer Dämpfung der sehr tieffrequenten Bässe ist es zusätzlich nötig, daß das Labyrinth kein einzelner Gang ist, auch wenn dieser einzelne Gang Windungen und Richtungsänderungen aufweist. Ein einzelner Gang verhielte sich akustisch wie ein Rohr, und besäße damit ein harmonisches Obertonspektrum, bei dem die höheren Frequenzen zur Grundfrequenz im Verhältnis 1:2:3, etc. stehen, also mit $f_1:f_0 = 2$, $f_2:f_0 = 3$, $f_3:f_0 = 4$, mit Grundfrequenz f_0 und den nächst höheren Frequenzen f_1, f_2 und f_3. Ein solches Dämpfungsspektrum ist allerdings sehr dünn. Auch wäre eine solche Geometrie eher ein Schlauch als ein Labyrinth. Beim Labyrinth der vorliegenden Patentschrift haben mehrere Labyrinthgänge zu mehreren benachbarten Labyrinthgängen offene Enden, so daß sich eine komplexere Geometrie ergibt. Diese ermöglicht ein erheblich dichteres Dämpfungsspektrum, mit Frequenzverhältnissen von $f_1:f_0 < 2$, f2:fo << 3, f3:fo << 4, etc. Ein solches viel dichteres Spektrum ist in der Lage, das beanspruchte breitbandige Dämpfungsverhalten herbeizuführen.

[0013] Das Labyrinth hat Eigenwerte, die von diesem tiefsten Eigenwert im Bassbereich bis zur oberen Hörgrenze von 20 kHz und darüber hinaus hat. Jeder Eigenwert des Labyrinthraums führt zu einer Resonanz des Schalls innerhalb der Wand für den Fall einer von außen auf die Wand eindringenden Schallwelle, deren Frequenz eine Resonanzfrequenz des Labyrinths ist. Die sehr große Anzahl und damit sehr große Dichte der Eigenfrequenzen des Labyrinths führt so zu einem breitbandigen Resonanz- und damit Dämpfungsverhaltens der Wand. Jede in der Wand resonierende Frequenz wird in der Wand ausgedämpft, so daß die Schallenergie dieser Frequenz nur noch sehr stark bedämpft aus der Vorder- und Rückseite der Wand heraustritt. Dies führt zu einer starken, breitbandigen Schalldämpfung durch die Wand, wobei das Dämpfungsverhalten fast nicht mehr frequenzabhängig ist. Dies unterscheidet diese Wand von herkömmlichen Schallabsorbern, bei denen meist ein Frequenzbereich stärker bedämpft ist als ein anderer.

[0014] Die Zeichnungen 1-5 zeigen ein Beispiel für eine solche Metamaterial-Wand. Zeichnung 1 stellt eine Wand aus einem Labyrinth dar, wie in Anspruch 1 und 2 beschrieben. Die grauen Flächen in Zeichnung 1 sind der Luftraum der Labyrinthstruktur bzw. der Labyrinthgänge, die weißen Flächen zwischen den grauen Flächen sind ein Material, etwa Holz oder Metall, welches die Labyrinthgänge voneinander trennt. Die Maße der Wand sind 1.012 m x 0.885 m. Diese Wand ist nur ein Beispiel für die Ansprüche dieser Patentschrift.

[0015] Der Luftraum des Labyrinths ist schwingungsfähig. Die Differentialgleichung, welche diese Schwingung be-

schreibt ist von zweiter Ableitung nach den betrachteten Raumrichtungen und von zweiter Ableitung nach der Zeit, wobei die abhängige Variable der Schallwechseldruck p ist. Für den zweidimensionalen Fall ist der Druck abhängig von den Raumrichtungen x und y sowie der Zeit t wie p(x,y,t), und somit lautet die Schwingungsgleichung:

$$c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \text{Gl. 1}$$

[0016] Hier ist c die Schallgeschwindigkeit. Die Eigenwertgleichung von Gl. 1, die die Frequenzen beschreibt, die in der Wand als Eigenfrequenzen schwingen können wird durch Teillösung nach der Zeit t gebildet mit

$$p(x, y, t) = p'(x, y) e^{\imath \omega t} \quad \text{Gl. 2}$$

[0017] Wird Gl. 2 in Gl. 1 eingesetzt und gelöst so erhält man die Eigenwertgleichung:

$$c^2 \left(\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} \right) = \omega^2 p' \quad \text{Gl. 3}$$

[0018] Hier ist die Kreisfrequenz

$$\omega = 2\pi f \quad \text{Gl. 4}$$

die Wurzel des Eigenwerts, f ist die Eigenfrequenz und p'(x,y) die Eigenfunktion zur Eigenfrequenz f. Die Rechnung ist zweidimensional und nicht dreidimensional ausgeführt, da die Tiefe der Wand in die dritte Dimension für die tiefsten Eigenwerte keine Rolle spielt. Die Tiefe ist nur so auszuführen, daß sie in etwa der Höhe und Breite der Labyrinthgänge entspricht, so daß der Luftinnenraum frei schwingen kann. In der in Zeichnung 4 dargestellten realisierten Wand ist die Wandtiefe des Luftinnenraums 8 cm.

[0019] Die Tiefe der Wand ist nur bei sehr hohen Frequenzen als Schallabsorber von Belang, bei denen sich Eigenschwingungen in der Tiefe ergeben können. Deren Wellenlängen müssen hierbei mindestens zweimal die Tiefe der Wand betragen. Da übliche Wände nicht mehr als etwa 10 cm Tiefe dieses Luftraum haben sind Eigenfrequenzen in der Tiefe erst ab etwa 4 kHz zu erwarten. Hier sind sie Teil der Schallabsorption der Wand im Bereich der hohen Frequenzen.

[0020] In Zeichnung 2 ist die tiefste Eigenfunktion bei der Eigenfrequenz 44 Hz dargestellt, wie sie sich als Lösung der Gl. 3 ergibt. Diese wurde mittels der Finite-Element Methode berechnet. Es wird nun angenommen, daß die Schallwelle, die auf die Wand trifft in der Wand resoniert und daher ihre Energie zu einem Großteil in der Wand verbraucht. Somit wird eine Dämpfung der Schallenergie erreicht, sowohl in der Transmission als auch in der Reflexion.

[0021] Die Konstruktion der hier dargestellten Wand von etwa 1 m^2 Fläche mit dem beispielhaften Labyrinth erlauben somit eine Dämpfung von Bässen bis hinunter zu 44 Hz. Da Wände über zwei Meter hoch und oft über zwei Meter breit sein können, und da das Labyrinth für solche Wände entsprechend größer ist, kann diese tiefste Dämpfungsfrequenz noch gesenkt werden. Die hier festgestellten 44 Hz bewegen sich aber bereits im tiefen Bassbereich und demonstrieren somit die Funktionsweise der Erfindung.

[0022] Dieser Dämpfungseffekt erstreckt sich auf den gesamten hörbaren Frequenzbereich, was exemplarisch in Zeichnung 3 dargestellt ist. Hier ist eine Eigenfunktion der Eigenfrequenz von 135 Hz gezeigt, wieder mittels Finite-Elemente Methode berechnet. Dieses Beispiel zeigt, daß beliebig höhere Eigenfrequenzen in der Wand vorhanden sind, welche sich durch immer komplexere Eigenfunktionen auszeichnen.

[0023] In Zeichnung 4 ist eine realisierte Wand dargestellt. Diese besteht aus vier der in Zeichnung 1 - 3 dargestellten Geometrien, welche baugleich sind und sich jeweils oben links, oben rechts, unten links und unten rechts in der gesamten Wand befinden. Diese Wiederholung ist realisiert, damit der Dämpfungseffekt auf einer größeren Fläche auftritt, da die Wand in einem Haus als Schiebewand eingebaut wurde.

[0024] Die Dämpfung durch die Wand wurde experimentell untersucht. In Zeichnung 5 ist der Unterschied des frequenzabhängigen Schalldruckpegels für zwei Fälle dargestellt. Im Fall 1 wurde ein Lautsprecher in einem Abstand von 2 cm vor die Wand aufgestellt. Aus dem Lautsprecher wurde ein Sweep, also ein aufsteigender Sinuston abgespielt, welcher von 20 Hz bis 20 kHz alle Frequenzen durchmaß. Auf der anderen Seite der Wand wurde im Abstand von 2 cm ein Mikrophon aufgebaut, welches eine Kugelcharakteristik hat. Der Schall des abstrahlenden Lautsprechers wurde mit diesem Mikrophon mittels Mikrophonvorverstärker verstärkt und mittels Analog-Digital Wandlers in einen Computer eingespeißt. Im Fall 2 wurde derselbe Versuchsaufbau wie in Fall 1 verwendet, mit dem einzigen Unterschied, daß hier die Wand zwischen Lautsprecher und Mikrophon entfernt wurde. Da die realisierte Wand eine Schiebewand ist war dies problemlos möglich, die Schiebewand wurde weggeschoben, so daß nun der Luftraum zwischen Lautsprecher und Mikrophon frei war. Alle anderen Einstellungen, wie Positionierung von Lautsprecher und Mikrophon im Raum, Vorverstärkung des Mikrophons, Abspielpegel des Lautsprechers, Art des Schallsignals und alle weiteren Meßparameter waren in Fall 1 und Fall 2 identisch.

[0025] Zur Auswertung der Messung wurden die beiden aufgezeichneten Schallsignale von Fall 1 und Fall 2 mit der Formel $L(f) = 20 \times \mathrm{Log}_{10}\,(p(f)_{\text{ohne wand}} / p(f)_{\text{mit wand.,}})$ zu einem frequenzabhängigen Lautstärkemaß L(f) verrechnet, wobei $p(f)_{\text{ohne wand}}$ der Schalldruck von Fall 2, $p(f)_{\text{mit wand}}$ der Schalldruck von Fall 1 ist und f die Frequenz bezeichnet. Die frequenzabhängigen Schalldrücke wurden hierbei mittels Fourier Analyse bestimmt. Das Maß L(f) entspricht dem üblichen ungewichteten, logarithmischen Maß für Lautstärke in dezibel (dB). Hierbei ist eine Dämpfung von 60 dB ein Lautstärkeunterschied, welcher als sehr hoch bezeichnet wird und einen Schall fast vollständig unhörbar macht.

[0026] Zeichnung 5 zeigt L(f) von 20 Hz bis 20 kHz. Die im Mittel erreichte Dämpfung liegt bei 38 dB (als Mittelwert der gezeigten Werte), wobei Spitzenwerte von 60 dB - 80 dB erreicht werden, sowie geringe Werte von 20 dB - 30 dB. Die realisierte Wand entspricht den Ansprüchen 1, 2 und 3, nicht aber den Ansprüchen 7, 8 und 9. Letztere sehen für die Innenseiten von Vorder- bzw. Rückseite der Wand, sowie für die Labyrinthgänge Bedeckungen vor, die zusätzlich schallabsorbierende Funktion haben. Diese sind in der hier als Beispiel gezeigten Wand aus Zeichnung 4 nicht realisiert, da diese Wand optisch durchlässig sei soll und somit auf Bedeckungen verzichtet werden mußte. Mit den Bedeckungen wird die Dämpfung erhöht werden, so daß, abhängig von dem Bedeckungsmaterial eine mittlere Dämpfung von 50 dB bis 60 dB zu erwarten ist. Eine Dämpfung von 60 dB gilt als eine sehr starke Dämpfung, bei welcher der Schall fast nicht mehr hörbar ist. Somit sind die Dämpfungseigenschaften der Wand gezeigt.

[0027] Der Grund für diese starke Dämpfung liegt in der Resonanzeigenschaft der Wand, in den Eigenfrequenzen und Eigenwerten. In Zeichnung 6 ist die Dämpfung der Wand für die Frequenzen 20 Hz - 200 Hz dargestellt. Zeichnung 6 ist ein Ausschnitt aus Zeichnung 5 für diesen Frequenzbereich. Es zeigen sich einzelne Peaks an bestimmten Frequenzen, d.h. sehr starke Dämpfungen. Der tiefste Peak liegt bei 45 Hz. Dies ist sehr nahe dem in Zeichnung 2 berechneten Peak von 44 Hz. Somit ist festgestellt, daß die Dämpfung durch die Eigenfunktionen der Luftschwingungen in der Wand erzeugt werden.

[0028] Dieser Effekt entspricht dem eines Metamaterials, da die auf die Wand auftreffende Welle bei tiefen Frequenzen eine Wellenlänge hat, die weit größer als die Wandtiefe von etwa 10 cm oder der Wandlänge und Breite von ca. 1 m ist. Die tiefste Frequenz von 44 Hz hat eine Wellenlänge von etwa 7.8 m. Die Wellentheorie geht davon aus, daß eine Beeinflussung, Beugung, Brechnung oder Reflexion einer Schallwelle nur dann erfolgt, wenn die Größenordnungen der Wellenlänge dieser Welle mit der Größenordnung des Gegenstands ist, an der sich die Welle bricht. Diese Wellentheorie vernachlässigt die innere Struktur des Gegenstandes, an dem sich die Welle bricht. Nach dieser Abschätzung ist eine Beeinflussung durch eine solche Wand bei tiefen Frequenzen ausgeschlossen.

[0029] Einzig die Labyrinthstruktur in der Wand ermöglicht eine Dämpfung bei so tiefen Frequenzen. Eine auf die Wand auftreffender Schallwechseldruck ist als Druck ein Skalar und kein Vektor wie etwa ein Geschwindigkeitsvektor eines Luftstroms, hat also als Druck keine bevorzugte Richtung. In die Wand eingedrungen ist jede Richtung für die Schallausbreitung gleich. Dies drückt das Huygen'sche Prinzip der Schallausbreitung aus, welches jede Schallwelle aus vielen Elementarwellen zusammengesetzt denkt. Jede dieser Elementarwellen hat eine kugelförmige Ausbreitung, was aus den skalaren Eigenschaften des Drucks folgt. Nur in der Summe ergibt sich eine komplexere Wellenfront. Der in die Wand eingedrungene Schallwechseldruck breitet sich also in alle Richtungen gleich aus. Da bei Resonanzfrequenz der Druckgradient in der Planenrichtung der Wand, also in der Wand erheblich größer ist als der hin zu Vorder- oder Rückseite, breitet sich der Schallwechseldruck viel stärker in der Wandplanenrichtung aus, als wieder aus der Wand herauszutreten. So führt eine Labyrinthstruktur, die im Sub-Wellenlängenbereich der eintreffenden Schallwelle liegt zu einer erheblichen Beeinflussung dieser Welle, was die Erfindung in dem Bereich der akustischen Metamaterialien rückt.

ERLÄUTERUNGEN ZU DEN ZEICHNUNGEN

[0030]

Zeichnung 1: Geometrie einer Wand mit einem Labyrinth nach Anspruch 1, 2 und 3. Die graue Fläche ist der Luftraum. Die weißen Flächen zwischen dem Luftraum ist Material, etwa Holz oder Metall.

Zeichnung 2: Tiefste Eigenfrequenz von etwa 44 Hz der Luftschwingung der Wand als Lösung der Differentialgleichung für Luft (Helmholtzgleichung) mit Schallwechseldruck p als abhängigen Parameter. Farbigkeit: Schallwechseldruck p.

Zeichnung 3: Höhere Eigenfrequenz von etwa 135 Hz der Luftschwingung der Wand als Lösung der Differentialgleichung für Luft (Helmholtzgleichung) mit Schallwechseldruck p als abhängigen Parameter. Farbigkeit: Schallwechseldruck p.

Zeichnung 4: Realisierte Wand nach Anspruch 1, 2 und 3. Das in Zeichnung 2 dargestellte Labyrinth ist viermal realisiert, oben rechts, oben links, unten rechts und unten links. Alle Realisierungen sind baugleich und sind vierfach ausgeführt, um als Wand in einem realen Raum zu dienen.

Zeichnung 5: Messung der Schalldämpfung der realisierten Wand aus Zeichnung 4. Dargestellt ist der Unterschied des Schalldrucks, der vor der Wand durch einen Lautsprecher erzeugt und mittels eines Mikrophons auf der anderen Seite der Wand aufgezeichnet wurde. Der Abstand von Lautsprecher und von Mikrophon zur Wandoberfläche beträgt beides Mal 2 cm. Der Schalldruckpegelunterschied ist berechnet als $L(f) = 20 \times \mathrm{Log}_{10}\, p(f)_{\text{ohne wand}} / p(f)_{\text{mit wand.}}$, wobei $p(f)_{\text{ohne wand}}$ der Schalldruck ist wenn keine Wand vorhanden ist und $p(f)_{\text{mit wand}}$ der Schalldruck ist, wenn zwischen Lautsprecher und Mikrophone die Wand steht.

Zeichnung 6: Ausschnitt aus Zeichnung 5, wobei hier der Frequenzbereich von 20 Hz - 200 Hz dargestellt ist. Es zeigen sich Peaks der Dämpfung, welche auf die Ursache der Dämpfung hinweisen, nämlich die Resonanz der Welle als Eigenfunktion innerhalb der Wand. Die Dämpfungen der sehr tiefen Frequenzen bis 30 Hz können auch von der Meßeinrichtung kommen, so daß der Lautsprecher sowie das Mikrophone diese tiefen Frequenzen nur unzureichend abstrahlen bzw. aufnehmen können. Die erste Resonanz darüber liegt bei 45 Hz, also sehr nahe der berechneten tiefsten Eigenfrequenz von 44 Hz.

GEWERBLICHE ANWENDUNGEN

[0031] Dieses Dämpfungsverhalten der hier erfundenen Wand ist in folgenden Anwendungen einsetzbar:

1) Eine Dämpfung bei Transmission, also das Dämpfen von Schall der in einem Raum erzeugt wurde hin in einen zweiten Raum.
2) Eine Dämpfung bei Reflexion, also der Unterdrückung des Zurückwerfens des Schalls, der in einem Raum erzeugt wurde in diesen Raum zurück.
3) Eine Dämpfung im Freien, also außerhalb geschlossener Räume, Häuser oder sonstiger geschlossener Gebäude. Hier ist die Dämpfung die von einem Ort zu einem zweiten, etwa einer Straße, eines Flugplatzes, eines Windrades, also eines Schallemissionsortes zu einem anderen Ort im Freien (Außenbereich), etwa einem privaten Grundstück, einem öffentlichen Park, einem Spielplatz o.ä.
4) Eine Dämpfung zwischen einem Bereich im Freien als Emissionsort und einem Innenbereich wie unter 2).
5) Eine Dämpfung zwischen einem Innenraum als Emissionsort und einem Außenbereich als Immissionsort wie unter 3).

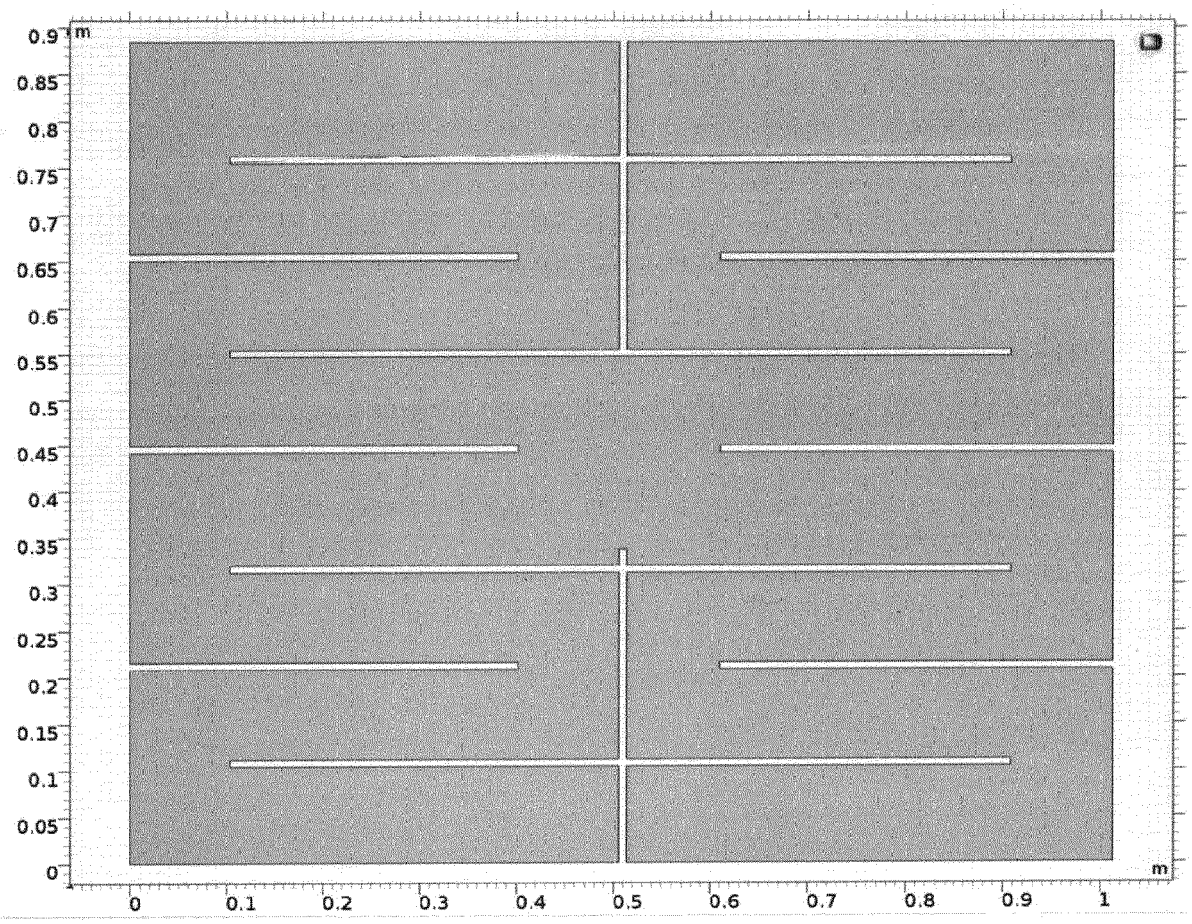
Patentansprüche

1. Eine Wand, aufweisend:

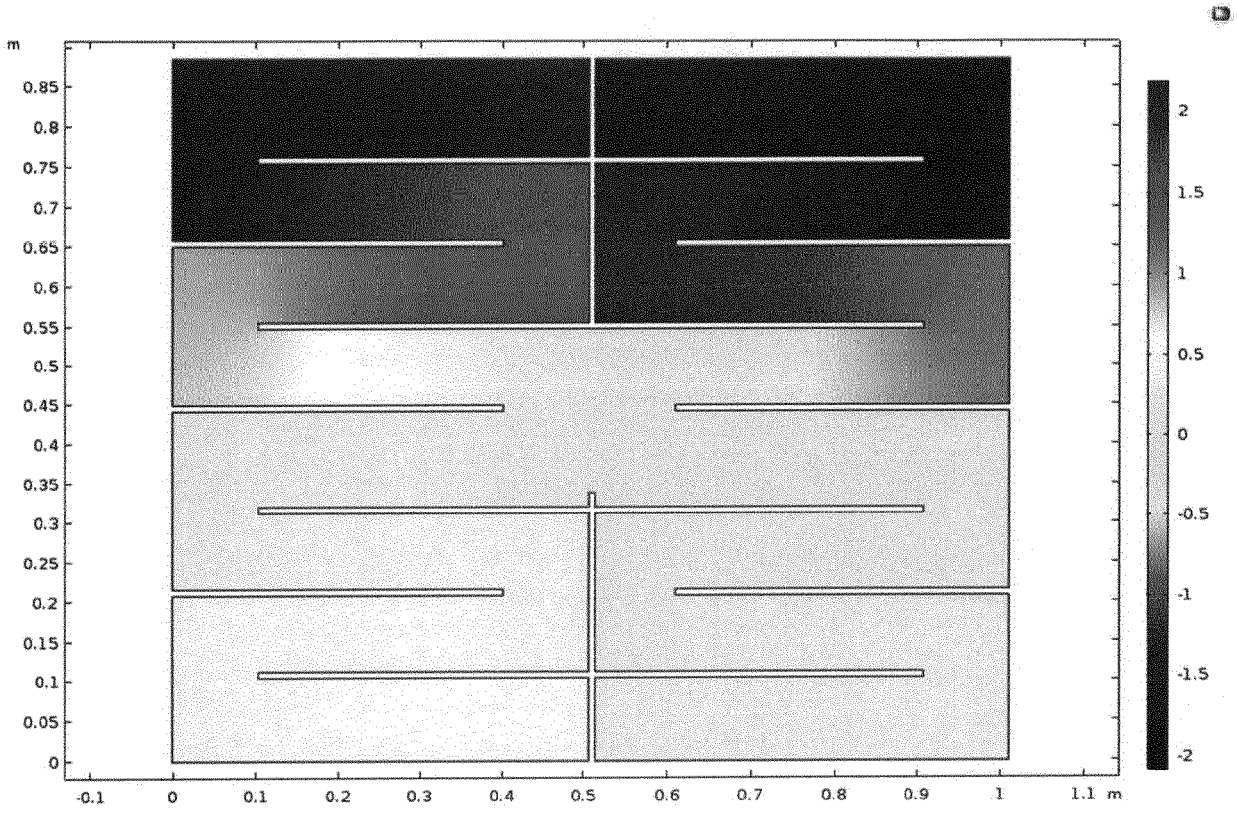
eine Wandbreite und eine Wandhöhe erheblich größer als die Wandtiefe;
eine mit Material vollständig geschlossene Vorderseite;
eine mit Material vollständig geschlossene Rückseite;
ein mit Material vollständig geschlossener Rand;
ein Luftraum zwischen Vorderseite und Rückseite;
eine Labyrinthstruktur in dem Luftraum zwischen Vorderseite und Rückseite,
die **dadurch gekennzeichnet ist, daß** einzelne Gänge an ihrem Gangende mit mehr als einem anderen Gang über ihre gesamte Labyrinthgangquerschnittsfläche durch einen offenen Luftraum verbunden sind, und
deren sämtliche Labyrinthgänge über diese offenen Labyinthgangquerschnittsflächen zu benachbarten Laryrinthgängen derart offen sind, so daß das gesamte Labyrinth ein verbundener Luftraum ist, und
die Längen der Labyrinthgänge im Sub-Wellenlängenbereich einer auf die Wand auftreffenden Schallwelle

liegen,
so daß die tiefste Eigenfrequenz der Lösung der Differentialgleichung für Luftschall (Helmholtzgleichung für Raumschall) des gesamten Labyrinths tiefer als 50 Hz liegt,
und bei der die Eigenfrequenzverhältnisse höherer Frequenzen zur tiefsten Eigenfrequenz kleiner als die harmonische Frequenzverhältnisse 2:3:4, etc. sind, also die Spektraldichte höher als die eines harmonischen Obertonspektrums ist.

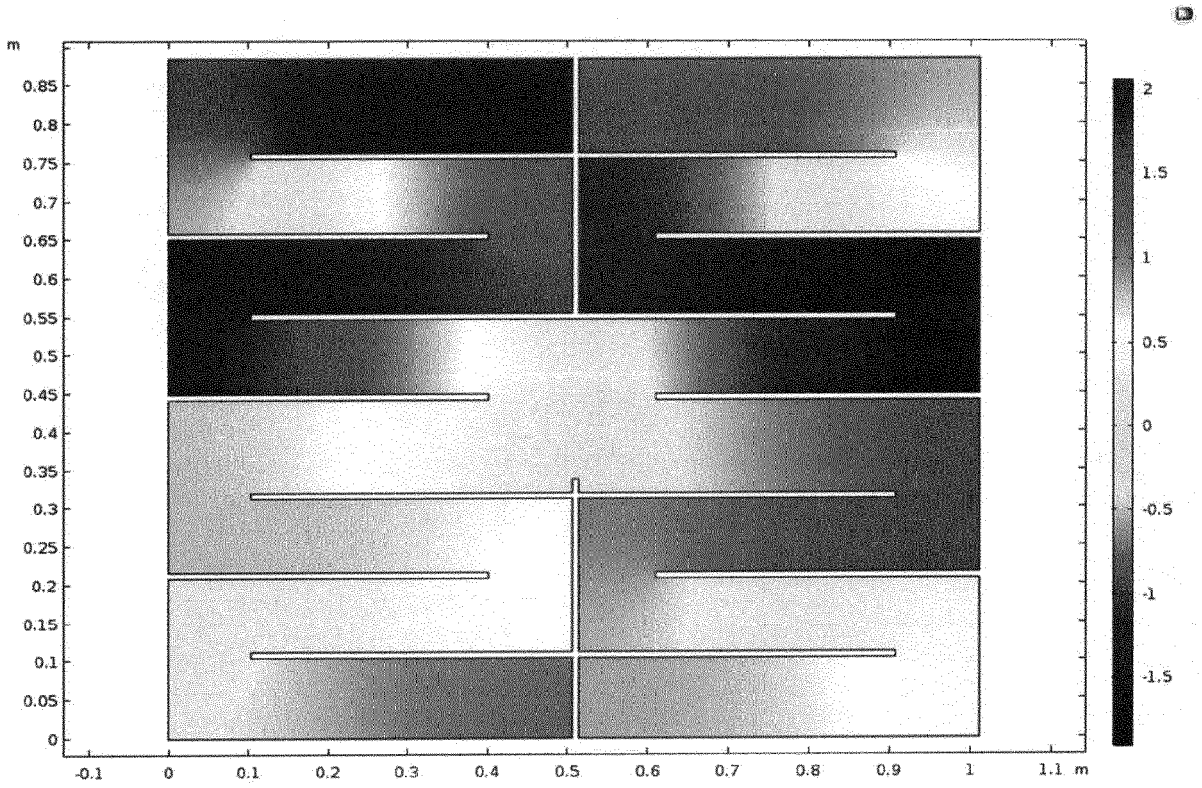
Zeichnung 1:


m
0.9
0.85
0.8
0.75
0.7
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
m

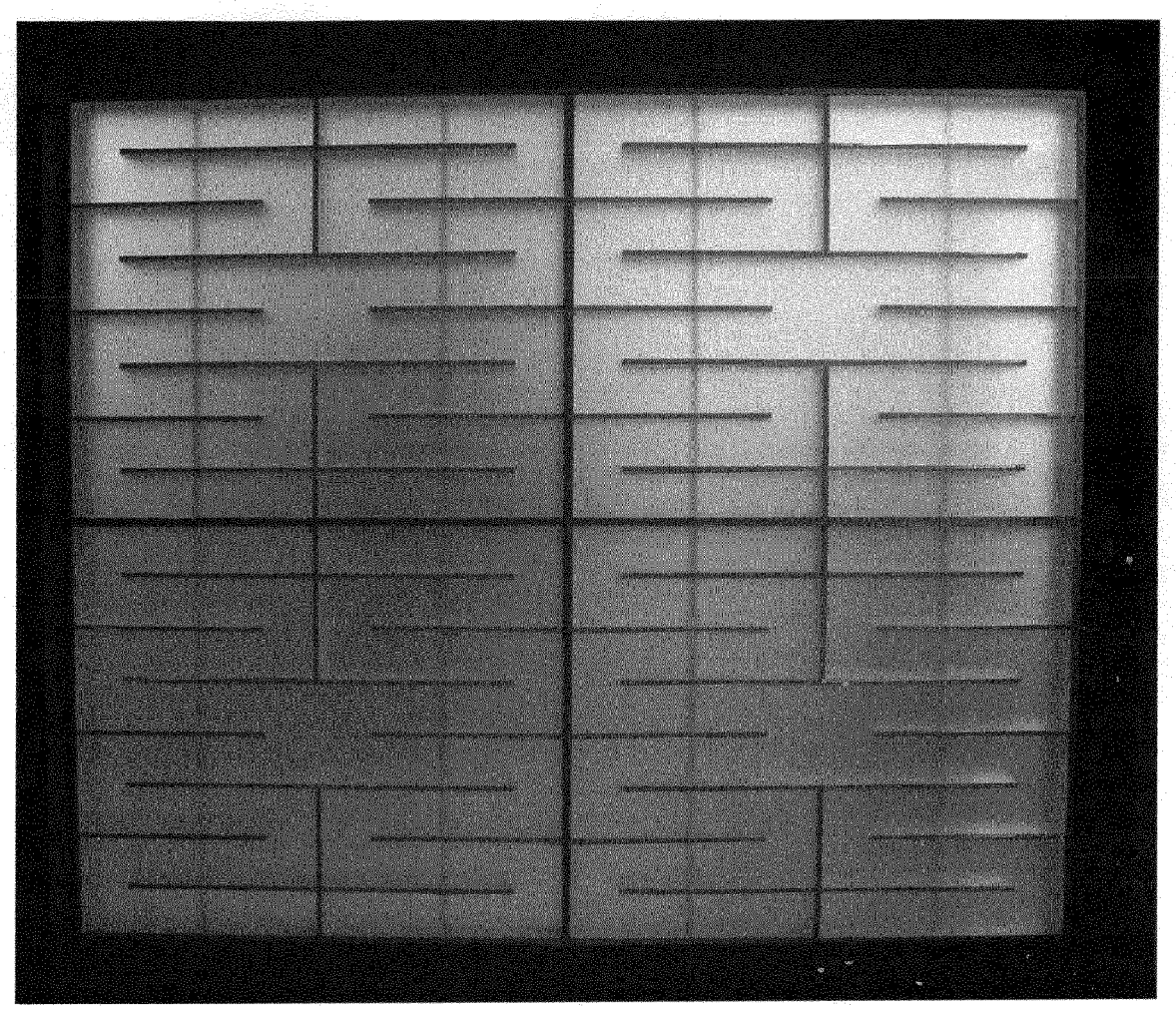
Zeichnung 2:


m
0.85
0.8
0.75
0.7
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1 m
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2

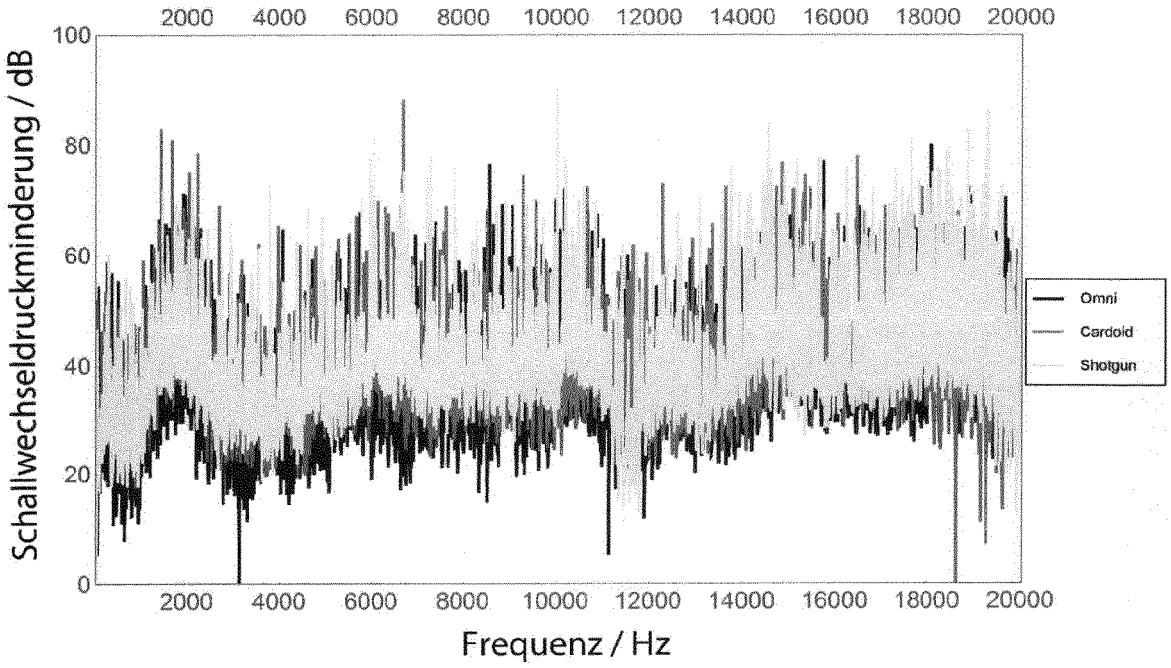
Zeichnung 3:


m
0.85
0.8
0.75
0.7
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1 m
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5

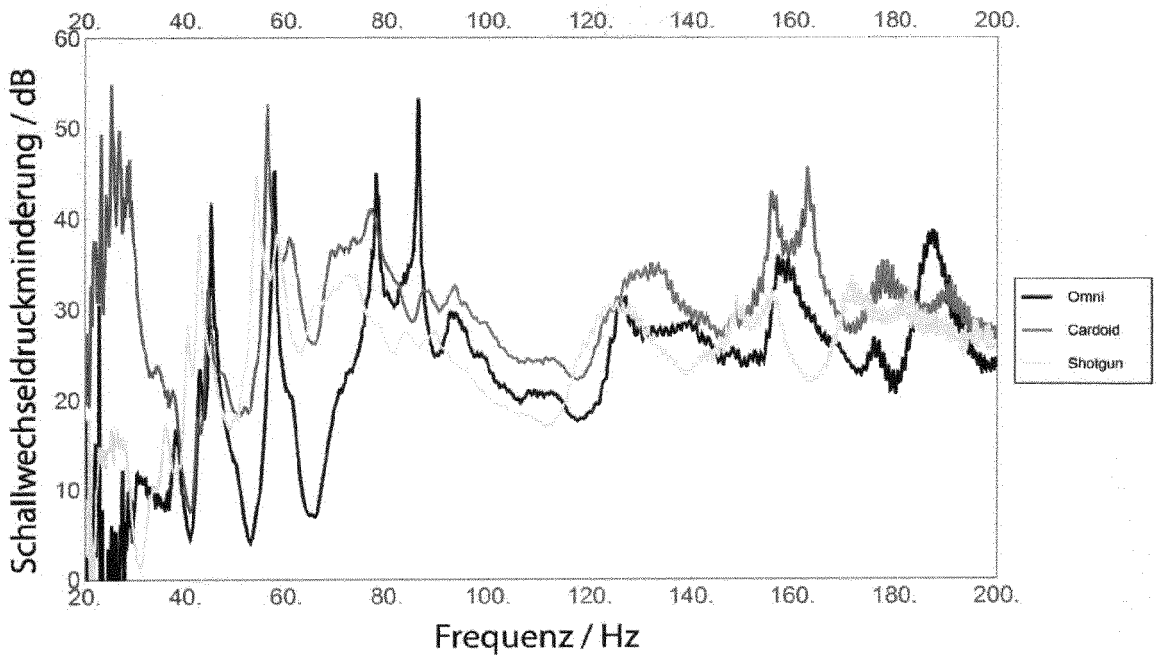
Zeichnung 4:



Zeichnung 5:


2000
4000
6000
8000
10000
12000
14000
16000
18000
20000
100
80
60
40
20
0
Schallwechseldruckminderung / dB
Frequenz / Hz
Omni
Cardoid
Shotgun

Zeichnung 6:


20.
40.
60.
80.
100.
120.
140.
160.
180.
200.
0
10
20
30
40
50
60
Schallwechseldruckminderung / dB
Frequenz / Hz
Omni
Cardoid
Shotgun

Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 20 00 0124

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE

Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	DE 31 19 499 A1 (MESSERSCHMITT BOELKOW BLOHM [DE]) 16. Dezember 1982 (1982-12-16) * Abbildungen * * das ganze Dokument * -----	1	INV. G10K11/172 G10K11/168 E04B1/82
A	CN 108 909 083 A (UNIV SOUTH CHINA TECH) 30. November 2018 (2018-11-30) * das ganze Dokument * -----	1	

RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)

E04B
G10K

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt

Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer
Den Haag	12. August 2020	Scappazzoni, E

KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE

X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet
Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie
A : technologischer Hintergrund
O : nichtschriftliche Offenbarung
P : Zwischenliteratur

T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze
E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
D : in der Anmeldung angeführtes Dokument
L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument

& : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR. EP 20 00 0124

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

12-08-2020

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 3119499 A1	16-12-1982	KEINE	
CN 108909083 A	30-11-2018	KEINE	

EPO FORM P0461

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

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **X.Q. ZHOU ; D.Y. YU ; X.Y. SHAO ; S.Q. ZHANG ; S. WANG.** Research and applications of viscoelastic vibration damping materials: A review. *Composite Structures,* 2016, vol. 135, 460-480 **[0004]**
- **A. PIERCE.** Intrinsic damping, relaxation processes, and internal friction in vibrating systems. *POMA,* 2010, vol. 9, 1-16 **[0004]**
- **M.R. HABERMAN ; A.N. NORRIS.** Acoustic Meta-materials. *Acoustics Today,* 2016, vol. 12 (3), 31-39 **[0008]**