



(11) **EP 4 247 006 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
20.09.2023 Patentblatt 2023/38

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
H04R 19/04^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **23189034.4**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
H04R 17/00; H04R 7/10; H04R 19/005;

(22) Anmeldetag: **28.05.2018**

H04R 31/003; H04R 19/02; H04R 19/04;
H04R 2201/003; H04R 2440/01; H04R 2499/11

(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**

- **Wagner, Bernhard**
25524 Itzehoe (DE)
- **Gu-Stoppel, Shanshan**
25524 Itzehoe (DE)

(30) Priorität: **26.05.2017 DE 102017208911**

(74) Vertreter: **Pfitzner, Hannes et al**
Schoppe, Zimmermann, Stöckeler
Zinkler, Schenk & Partner mbB
Patentanwälte
Radtkoferstraße 2
81373 München (DE)

(62) Dokumentnummer(n) der früheren Anmeldung(en)
nach Art. 76 EPÜ:
18729366.7 / 3 632 135

(71) Anmelder: **Fraunhofer-Gesellschaft zur
Förderung
der angewandten Forschung e.V.**
80686 München (DE)

Bemerkungen:

Diese Anmeldung ist am 01.08.2023 als
Teilanmeldung zu der unter INID-Code 62 erwähnten
Anmeldung eingereicht worden.

(72) Erfinder:
• **Stoppel, Fabian**
25524 Itzehoe (DE)

(54) **MIKROMECHANISCHER SCHALLWANDLER**

(57) Ein mikromechanischer Schallwandler umfasst entsprechend einem ersten Aspekt einen ersten Biegewandler mit einem freien Ende und einem zweiten Biegewandler mit einem freien Ende, die in einer gemeinsamen Ebene angeordnet sind, wobei das freie Ende des ersten Biegewandlers von dem freien Ende des zweiten Biegewandlers durch einen Spalt getrennt ist. Der zweite Biegewandler wird phasengleich zu der vertikalen

Schwingung des ersten Biegewandlers angeregt. Ein mikromechanischer Schallwandler umfasst gemäß einem zweiten Aspekt einen ersten Biegewandler, der vertikal zur Schwingung angeregt wird und einen vertikal zu dem ersten Biegewandler erstreckendes Blendelement, das durch einen Spalt von einem freien Ende des ersten Biegewandlers getrennt ist.

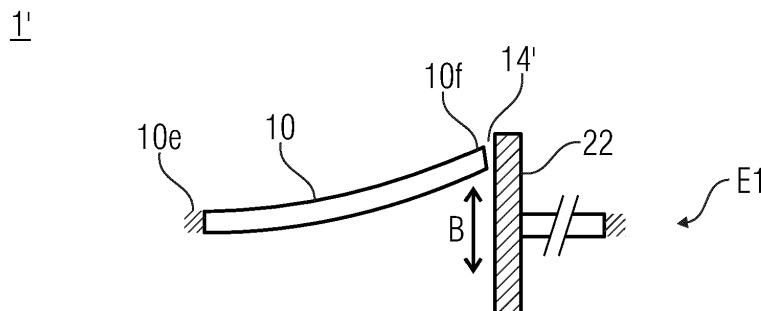


Fig. 1b

EP 4 247 006 A2

Beschreibung

[0001] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung beziehen sich auf einen mikromechanischen Schallwandler mit mindestens einem Biegeaktuator (allgemein Biegegewandler) und miniaturisierten Spalt sowie auf einen miniaturisierten Schallwandler mit einem kaskadierten Biegegewandler. Zusätzliche Ausführungsbeispiele beziehen sich auf entsprechende Herstellungsverfahren.

[0002] Während MEMS in nahezu allen Bereichen Einzug erhalten haben, werden miniaturisierte Schallwandler nach wie vor in Feinwerktechnik hergestellt. Diese sogenannten "Microspeaker" basieren auf dem elektrodynamischen Antriebssystem, bei dem mittels einer sich in einem permanenten Magnetfeld bewegenden Tauchspule eine Membran ausgelenkt wird. Ein wesentlicher Nachteil dieser konventionellen elektrodynamischen Schallwandler ist die geringe Effizienz und der daraus folgende hohe Leistungsverbrauch von oftmals über einem Watt. Darüber hinaus verfügen derartige Schallwandler über keinerlei Positionssensorik, sodass die Bewegung der Membran ungerichtet ist und bei höheren Schalldruckpegeln hohe Verzerrungen auftreten. Weitere Nachteile liegen in hohen Serienstreuungen sowie relativ großen Bauhöhen von meist über 3 mm.

[0003] Aufgrund hochpräziser Herstellungsverfahren sowie energieeffizienter Antriebsprinzipien haben MEMS das Potenzial, diese Nachteile zu überwinden und eine neue Generation von Schallwandlern zu ermöglichen. Ein grundlegendes Problem stellen bislang jedoch die zu niedrigen Schalldruckpegel von MEMS-Schallwandlern dar. Die primäre Ursache hierfür liegt in der Schwierigkeit, bei möglichst kleinen Abmessungen ausreichend hohe Hubbewegungen zu erzeugen. Erschwerend kommt dazu, dass zur Unterbindung eines akustischen Kurzschlusses eine Membran erforderlich ist, welche sich infolge ihrer zusätzlichen Federsteifigkeit negativ auf die Gesamtauslenkung auswirkt. Letzteres lässt sich durch Einsatz von sehr weichen und dreidimensional geformten Membranen (z. B. mit Torus) minimieren, die derzeit jedoch nicht in MEMS-Technologie hergestellt werden können und entsprechend aufwendig und kostspielig hybrid integriert werden.

[0004] In Publikationen und Patentschriften werden MEMS-Schallwandler unterschiedlichster Ausführungen behandelt, woraus u.a. aufgrund o.g. Probleme noch keine marktreifen Produkte hervorgegangen sind. Diese Konzepte basieren auf geschlossenen Membranen, die in Schwingung versetzt werden und Schall generieren. In [Hou13, US2013/156253A1] wird z. B. ein elektrodynamischer MEMS-Schallwandler beschrieben, der die hybride Integration einer Polymembran sowie eines Permanentmagnetrings erfordert. Das Konzept von piezoelektrischen MEMS-Schallwandlern wurde in [Yi09, Dej12, US7003125, US8280079, US2013/0294636A1] dargestellt. Hier wurden piezoelektrische Materialien, wie PZT, AlN oder ZnO direkt auf siliziumbasierte Schallwandlermembranen aufgebracht, welche infolge ihrer geringen Elastizität jedoch keine ausreichend großen Auslenkungen zulassen. Ein weiterer piezoelektrischer MEMS-Schallwandler mit einem plattenförmigen Körper, der über eine Membran oder mehrere Aktuatoren kolbenförmig aus der Ebene ausgelenkt wird, ist in [US 20110051985A1] dargestellt. Digitale MEMS-Schallwandler auf Basis von Arrays mit elektrostatisch angetriebenen Membranen, die allerdings nur bei hohen Frequenzen ausreichend hohe Schalldrücke erzeugen können, werden in [Gla13, US7089069, US20100316242A1] beschrieben. Deshalb besteht der Bedarf nach einem besseren Ansatz.

[0005] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen mikromechanischen Schallwandler zu schaffen, der einen verbesserten Kompromiss aus Schalldruck, Frequenzgang und Herstellungsaufwand darstellt.

[0006] Die Aufgabe wird durch die unabhängigen Patentansprüche gelöst.

[0007] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung schaffen einen mikromechanisch Schallwandler (z.B. in einem Substrat aufgebaut) mit einem ersten Biegegewandler bzw. Biegeaktuator sowie einem zweiten Biegegewandler bzw. Biegeaktuator. Der erste Biegeaktuator weist ein freies Ende und z.B. mindestens eine oder zwei freie Seiten auf und ist ausgebildet, um beispielsweise durch ein Audiosignal zur vertikalen Schwingung angeregt zu werden und Schall zu emittieren (bzw. aufzunehmen). Der zweite Biegeaktuator weist ebenfalls ein freies Ende auf und ist gegenüber dem ersten Biegeaktuator derart angeordnet, dass der erste und der zweite Biegeaktuator in einer gemeinsamen Ebene liegen bzw. aufgehängt sind. Weiter ist die Anordnung derart ausgestaltet, dass zwischen dem ersten und dem zweiten Biegeaktuator ein Spalt (z. B. im Mikrometerbereich) gebildet wird, der die zwei Biegeaktuatoren voneinander trennt. Der zweite Biegeaktuator wird immer phasengleich zum ersten Biegeaktuator zur Schwingung angeregt, was die Konsequenz hat, dass der Spalt im Wesentlichen über die gesamte Auslenkung der Biegeaktuatoren konstant bleibt.

[0008] Ausführungsbeispielen für diesen Aspekt der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass durch die Verwendung mehrerer voneinander separierter Biegegewandler bzw. Aktuatoren, die mit einem minimalen (Separierungs-) Spalt voneinander separiert sind, es bei identischer Auslenkung der zwei Wandler bzw. Aktuatoren aus der Ebene erreicht werden kann, dass der Spalt zwischen den zwei Aktuatoren annähernd konstant klein (im Mikrometerbereich) bleibt, so dass immer hohe Viskositätsverluste in dem Spalt vorliegen, die im Resultat einen akustischen Kurzschluss zwischen dem Hintervolumen und dem Vordervolumen (des Biegeaktuators) verhindern. Im Vergleich zu bisherigen, meist auf geschlossenen Membranen basierenden MEMS-Systemen ermöglicht das vorliegende Konzept eine deutliche Leistungssteigerung. Der primäre Grund liegt darin, dass infolge der Aktuatorenkopplung keine Energie für die Verformung von zusätzlichen mechanischen Membranelementen aufgewendet werden muss, wodurch deutlich höhere Auslenkun-

gen und Kräfte möglich sind. Darüber hinaus treten Nichtlinearitäten erst bei deutlich größeren Bewegungsamplituden auf. Während herkömmliche Systeme mitunter komplex geformte Membranen oder Magnete benötigen, die sich bislang nicht in MEMS-Technologie realisieren, sondern nur mit hohem Aufwand hybrid integrieren lassen, lässt sich das vorliegende Konzept mit gängigen Verfahren der Siliziumtechnologie realisieren. Dies bietet signifikante Vorteile bei Herstellung und Kosten. Durch die konzept- und materialbedingt geringe schwingende Masse, lassen sich Systeme mit

einem außerordentlich breitem Frequenzbereich und gleichzeitig hohen Bewegungsamplituden realisieren.
[0009] Entsprechend einem weiteren Aspekt wird ein mikromechanischer Schallwandler mit einem ersten Biegegewandler bzw. Biegeaktuator (zur vertikalen Schwingung anregbar ausgelegt) sowie einem vertikal (d.h. aus der Ebene des Substrats und damit auch aus der Erstreckungsebene des Biegewandlers) zu dem ersten Biegegewandler bzw. Biegeaktuator erstreckenden Blendenelement geschaffen. Das Blendenelement ist durch einen Spalt (Lücke) von dem freien Ende des ersten Biegeaktuators getrennt.

[0010] Die Erkenntnis dieses Aspekts liegt darin, dass durch das Blendenelement über den gesamten Bewegungsbereich des Wandlers bzw. Aktuators (infolge der Schwingung) es erreicht werden kann, dass der Abstand zwischen dem Blendenelement und dem freien Ende des Aktuators annäherungsweise konstant bleibt. Hierdurch wird der gleiche Effekt wie oben erzielt, nämlich dass aufgrund der hohen viskosen Verluste an dem freien Ende (und ggf. auch den freien Seiten) bzw. in dem Spalt ein akustischer Kurzschluss verhindert werden kann. Im Resultat heißt das, dass sich die gleichen Vorteile insbesondere hinsichtlich des Wirkungsgrads des Schallwandlers, der Breitbandigkeit und der Herstellungskosten ergeben.

[0011] Ein Ausführungsbeispiel bezieht sich auf ein Herstellungsverfahren eines derartigen Aktuators mit Blendenelement. Dieses Verfahren umfasst die Schritte: Strukturieren einer Schicht, um den ersten Biegeaktuator zu formen sowie Herstellen oder Abscheiden des vertikalen Blendenelements, so dass dieses über die Schicht des ersten Biegeaktuators hinausragt. Vertikal ist beispielsweise als senkrecht (senkrecht zur Substratebene) oder allgemein gewinkelt gegenüber dem Substrat (Winkelbereich 75°-105°) zu verstehen.

[0012] Zu der Variante mit den mindestens zwei Biegeaktuatoren sei angemerkt, dass entsprechend Ausführungsbeispiel der erste und der zweite Biegeaktuator gleichartige Biegeaktuatoren sind. Diese können beispielsweise flächige, rechteckige, trapezförmige oder allgemein vieleckige Biegeaktuatoren sein. Entsprechend einem weiteren Ausführungsbeispiel können diese Biegeaktuatoren jeweils eine Dreiecksform oder eine Kreissegmentform aufweisen. Die dreieckige oder kreissegmentförmige Form kommt häufig bei mikromechanischen Schallwandlern zum Einsatz, die mehr als zwei Biegeaktuatoren umfassen. Insofern umfasst entsprechend einem weiteren Ausführungsbeispiel der mikromechanische Schallwandler einen oder mehrere weitere Biegeaktuatoren, wie z. B. drei oder vier Biegeaktuatoren.

[0013] Wie oben bereits erläutert, ermöglicht entweder die gleichzeitige bzw. phasengleiche Ansteuerung der zwei Biegeaktuatoren oder das Vorsehen des Blendenelements, dass ausgehend von einem Spalt, die (im Ruhezustand) kleiner 10% oder sogar kleiner 5%; 2,5%, 1%, 0,1% oder 0,01% der Fläche des ersten Biegeaktuators beträgt, der Spalt über den gesamten Bewegungsbereich klein bleibt, d. h. dass er selbst bei Auslenkung maximal 15% oder sogar nur 10% (oder 1% oder 0,1% oder 0,01%) der Fläche des ersten Biegeaktuators ausmacht. Bezüglich der Variante mit dem Blendenelement sei angemerkt, dass die Höhe des Blendenelements derart dimensioniert ist, dass dieses mindestens 30% oder 50% oder bevorzugt 90% oder sogar 100% oder mehr der maximalen Auslenkung des ersten Biegeaktuators im linearen Betrieb (d.h. linearer mechano-elastischer Bereich) oder der maximalen elastischen Auslenkung des ersten Biegewandlers (allgemein 5-100%) beträgt. Alternativ kann die Höhe in Abhängigkeit von der Spaltbreite (mindestens 0,5-mal, 1-mal, 3-mal oder 5-mal Spaltbreite) oder in Abhängigkeit von der Dicke des Biegewandlers (mindestens 0,1-mal, 0,5-mal, 1-mal, 3-mal oder 5-mal Dicke) definiert werden. Diese Dimensionierungsvorschriften für die zwei Varianten ermöglichen über den gesamten Auslenkungsbereich und damit auch über den gesamten Schallpegelbereich die oben erläuterte Funktionalität / Verhinderung von akustischen Kurzschlüssen.

[0014] Entsprechend einem weiteren Ausführungsbeispiel kann nicht nur ein Blendenelement gegenüber dem freien Ende angeordnet sein, sondern auch beispielsweise an den nichteingespannten Seiten um den Biegeaktuator herum. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn der Biegeaktuator ein einseitig eingespannter Biegeaktuator ist.

[0015] Entsprechend einem Ausführungsbeispiel kann das Blendenelement in seinem Querschnitt eine variierende Geometrie (z.B. eine zu dem Aktuator hin gekrümmte/geneigte Geometrie) aufweisen, so dass der Schlitz weitestgehend einen konstanten Querschnitt entlang der Aktuator-Bewegung hat. Entsprechend Ausführungsbeispielen kann die Blende einen mechanischen Anschlag formen, um eine mechanische Überlastung zu verhindern.

[0016] Entsprechend einem weiteren Ausführungsbeispiel wird ein mikromechanischer Schallwandler geschaffen, der eine Steuerung umfasst, die den zweiten Biegeaktuator so ansteuert, dass er phasengleich zu dem ersten Biegeaktuator zur Schwingung angeregt wird. Darüber hinaus kann es entsprechend einem weiteren Ausführungsbeispiel vorteilhaft sein, wenn eine Sensorik vorgesehen wird, die die Schwingung und/oder die Position des ersten und/oder des zweiten Biegeaktuators erfasst, um der Steuerung zu ermöglichen, dass die zwei Biegeaktuatoren gleichphasig angesteuert werden. Im Gegensatz zu bisherigen Systemen, die meist über keine Sensorik verfügen oder nur die Auslenkung des Antriebs (nicht nur Membran) erfassen, lässt sich bei diesem Prinzip mithilfe der gut integrierbaren Sensorik die tatsächliche Position des schallerzeugenden Elements bestimmen. Dies ist von großem Vorteil und ermöglicht eine deutlich

genauere und zuverlässigere Detektion. Diese bildet die Grundlage für eine geregelte Anregung (Closed-Loop), mit sich äußere Einflüsse, Alterungseffekte und Nichtlinearitäten elektronisch kompensieren lassen.

[0017] Entsprechend einem Ausführungsbeispiel können die Biegeaktuatoren auch eine sogenannte "Kaskadierung" aufweisen. Das heißt also, dass der erste und/oder der zweite Biegeaktuator jeweils zumindest ein erstes und ein zweites Biegeelement umfassen. Diese Elemente sind in Serie geschaltet. Entsprechend Ausführungsbeispielen heißt "in Serie geschaltet", dass das erste und zweite Biegeelement ein eingespanntes Ende und ein freies Ende aufweisen und das zweite Biegeelement mit seinem eingespannten Ende an das freie Ende des ersten Biegeactuators angreift und mit seinem freien Ende das freie Ende des gesamten Biegeactuators formt. Hierbei kann die Verbindung zwischen den zwei Biegeelementen beispielsweise durch ein flexibles Element gebildet sein. Optional kann der mikromechanische Schallwandler einen zusätzlichen Rahmen aufweisen, der beispielsweise im Bereich des Übergangs zwischen dem ersten und dem zweiten Biegeelement vorgesehen ist. Dieser dient zur Versteifung und zur Modenentkopplung. Bezüglich der zwei Biegeelemente sei angemerkt, dass diese entsprechend einem bevorzugten Ausführungsbeispiel mit unterschiedlichen Steuersignalen angesteuert werden, so dass beispielsweise das innenliegende Biegeelement bzw. die innenliegenden Biegeelemente für höhere Frequenzen genutzt werden, während die weiter außenliegenden Biegeelemente zu einer Schwingung in einem tieferen Frequenzbereich angesteuert werden.

[0018] Entsprechend einem weiteren Aspekt wird ein mikromechanischer Schallwandler mit zumindest einem, bevorzugt zwei Biegeaktuatoren geschaffen, wobei jeder Biegeaktuator ein erstes und ein zweites Biegeelement umfasst, die in Serie geschaltet sind. Derartige Biegeaktuatoren können entsprechend einem weiteren Ausführungsbeispiel statt einem Separierungsspalt auch eine flexible Verbindung aufweisen.

[0019] Ausführungsbeispiele dieses Aspekts der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass durch das Inserie-Schalten von mehreren Biegeelementen eines Biegeactuators es erreicht werden kann, dass unterschiedliche Biegeaktuatoren für unterschiedliche Frequenzbereiche zuständig sind. So kann beispielsweise der innenliegende Biegeaktuator für einen Hochtonfrequenzbereich ausgebildet sein, während der weiter außenliegende Frequenzbereich für den Tiefton betrieben wird. Im Gegensatz zu üblichen Membranansätzen ermöglicht das beschriebene Konzept eine Kaskadierung mit mehreren individuell ansteuerbaren Aktuatorstufen. Darüber hinaus lassen sich durch die frequenzseparierte Ansteuerung in Kombination mit den piezoelektrischen Antrieben deutliche Steigerungen bei der Energieeffizienz erzielen. Die gute Modenentkopplung bietet überdies Vorteile bei der Wiedergabequalität. Weitere Vorteile sind z. B. die Realisierung von besonders platzsparenden Mehrwege-Schallwandlern.

[0020] Auch bei diesem Ausführungsbeispiel des Biegeactuators mit der Kaskadierung sind die Weiterbildungen, wie sie oben erläutert wurden, entsprechend zusätzlichen Ausführungsbeispielen anwendbar. Hierbei sind insbesondere die Merkmale bezüglich der genauen Ausgestaltung der Kaskadierung, z. B. des Verbindungselements oder der Rahmen, zu nennen. Des Weiteren sind die Unteransprüche bezüglich der flächigen, rechteckigen, trapezförmigen oder dreieckigen (allgemein vieleckigen) Biegeaktuatorgeometrie für kaskadierte Schallwandlerkonfigurationen relevant.

[0021] Ein weiteres Ausführungsbeispiel bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Schallwandlers mit kaskadierten Biegeaktuatoren. Das Verfahren umfasst die Schritte: Bereitstellen einer ersten Schicht, die den ersten (und den zweiten) Biegeaktuator mit dem (jeweils) ersten und zweiten Biegeelement formt und Verbinden der (jeweils) ersten und zweiten Biegeelemente.

[0022] Entsprechend einem Ausführungsbeispiel wäre es denkbar, Aktuatoren ineinander zu verschachteln und/oder unterschiedlich groß zu gestalten, z.B. um unterschiedliche Frequenzbereiche abzudecken.

[0023] Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen definiert. Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung wurden beiliegend anhand der Figuren erläutert. Es zeigen:

Fig. 1a eine schematische Darstellung eines mikromechanischen Schallwandlers mit zwei Biegeaktuatoren gemäß einem Basisausführungsbeispiel;

Fig. 1b eine schematische Darstellung eines mikromechanischen Schallwandlers mit einem Biegeaktuator sowie einem vertikalen Blendenelement gemäß einem weiteren Basisausführungsbeispiel;

Fig. 1c eine schematische Darstellung eines Biegeactuators mit einer beliebig angrenzenden Struktur zur Illustration der Verbesserung der Konzepte aus den Fig. 1a und 1b gegenüber dem Stand der Technik;

Fig. 2a-c schematische Querschnitte möglicher Aktuatorelemente gemäß Ausführungsbeispiel;

Fig. 3a-d schematische Draufsichten von Biegeaktuatorkonfigurationen gemäß Ausführungsbeispielen;

Fig. 4 ein schematisches Diagramm zur Illustration eines simulierten Schalldruckpegels für unterschiedliche Ausführungsbeispiele;

- Fig. 5 eine schematische Darstellung eines mikromechanischen Schallwandlers mit zwei Biegeaktuatoren, die jeweils eine Kaskadierung umfassen, gemäß Ausführungsbeispielen;
- 5 Fig. 6a-c schematische Draufsichten auf Biegeaktuatorkonfigurationen mit Kaskadierung gemäß Ausführungsbeispielen;
- Fig. 7 ein schematisches Diagramm zur Illustration eines simulierten Schalldruckpegels mit einer Biegeaktuatorkonfiguration mit Kaskadierung;
- 10 Fig. 8a,b schematische Ansichten oder Teilansichten einer Draufsicht auf eine Biegeaktuatorkonfiguration mit Kaskadierung gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel;
- Fig. 9 ein schematisches Diagramm zur Illustration einer mittels FEM-simulierten Auslenkung eines mikromechanischen Schallwandlers mit Kaskadierungen gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- 15 Fig. 10a-c schematische Draufsichten auf Biegeaktuatoren mit seitlich angeordneten Blendenelementen gemäß Ausführungsbeispielen;
- Fig. 11a-d schematische Darstellungen zur Illustration eines Prozessablaufs bei der Herstellung eines mikromechanischen Schallwandlers gemäß Ausführungsbeispielen;
- 20 Fig. 12 eine schematische Darstellung eines Arrays mit einer Vielzahl an mikromechanischen Schallwandlern gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- 25 Fig. 13a-i zeigt schematische Darstellungen von unterschiedlichen Implementierungen der in Fig. 1b erläuterten Blendenstrukturen gemäß Ausführungsbeispielen;
- Fig. 14a-c schematische Darstellungen von mikromechanischen Schallwandlern mit einem Deckel gemäß zusätzlichen Ausführungsbeispielen;
- 30 Fig. 15a-h schematische Darstellungen von Draufsichten auf mikromechanische Schallwandler gemäß Ausführungsbeispielen; und
- 35 Fig. 16 eine schematische Darstellung eines zweiseitig eingespannten mikromechanischen Schallwandler gemäß Ausführungsbeispielen.

[0024] Bevor nachfolgend Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung anhand der beiliegenden Zeichnungen im Detail erläutert werden, sei darauf hingewiesen, dass gleichwirkende Elemente und Strukturen mit gleichen Bezugszeichen versehen sind, so dass die Beschreibung derer aufeinander anwendbar bzw. austauschbar ist.

40 **[0025]** Fig. 1a zeigt einen Schallwandler 1 mit einem ersten Biegeaktuator 10 sowie einem zweiten Biegeaktuator 12. Beide sind in einer Ebene E1 angeordnet bzw. eingespannt, wie anhand der Einspannung 10e und 12e zu erkennen ist. Die Einspannung kann dadurch realisiert sein, dass die Biegeaktuatoren 10 und 12 aus einem gemeinsamen Substrat (nicht dargestellt) herausgeätzt sind, sodass die Biegeaktuatoren 10 und 12 einseitig mit dem Substrat verbunden sind und unter den Aktoren 10 und 12 eine (gemeinsame) Kavität (nicht dargestellt) gebildet ist. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die hier dargestellten Biegeaktuatoren 10 und 12 beispielsweise vorgespannt sein können, so dass die Darstellung entweder einen Ruhezustand darstellt, oder auch einen ausgelenkte Momentaufnahme zeigt (für diesen Fall ist mittels der gestrichelten Linie der Ruhezustand dargestellt). Wie zu erkennen ist, sind die zwei Aktuatoren 10 und 12 horizontal nebeneinander angeordnet, so dass die Aktuatoren 10 und 12 oder zumindest die Einspannungen 10e und 12e in einer gemeinsamen Ebene E1 liegen. Diese Aussage bezieht sich bevorzugt auf den Ruhezustand, wobei sich im vorgespannten Fall die Ebene E1 vor allem auf die gemeinsamen Einspannungsbereiche 10e und 12e bezieht.

50 **[0026]** Die beiden Aktuatoren 10 und 12 sind gegenüberliegend angeordnet, so dass zwischen denselben ein Spalt 14 von beispielsweise von 5 μm , 25 μm oder 50 μm (allgemein im Bereich zwischen 1 μm und 90 μm , bevorzugt kleiner 50 μm oder kleiner 20 μm) besteht. Dieser Spalt 14, der die zwei einseitig eingespannten Biegeaktuatoren 12 und 14 trennt, kann als Entkopplungsspalt bezeichnet werden. Der Entkopplungsspalt 14 variiert über den gesamten Auslenkungsbereich der Aktuatoren 10 und 12 nur minimal, z.B. um Faktor 1, 1,5 oder 4 (allgemein im Bereich 0,5-5), d. h. Variation kleiner +500%, +300%, +100% oder +75% oder kleiner +50% der Spaltbreite (im Ruhezustand), um so auf eine zusätzliche Abdichtung verzichten zu können, wie nachfolgend ausgeführt werden wird.

55 **[0027]** Die Aktuatoren 10 und 12 werden vorzugsweise piezoelektrisch angetrieben. Jeder dieser Aktuatoren 10 und

12 kann beispielsweise einen Schichtaufbau aufweisen und neben den piezoelektrischen aktiven Schichten ein oder mehrere passive Funktionsschichten aufweisen. Alternativ sind auch elektrostatische, thermische oder magnetische Antriebsprinzipien möglich. Wird an den Aktuatoren 12 eine Spannung angelegt, so verformt sich dieser bzw. im piezoelektrischen Fall das piezoelektrische Material der Aktuatoren 10 und 12 und bewirkt eine Verbiegung der Aktuatoren 10 und 12 aus der Ebene hinaus. Diese Verbiegung resultiert in einer Verdrängung von Luft. Bei einem zyklischen Steuerungssignal wird dann so der jeweilige Aktuator 10 und 12 zur Schwingung angeregt, um ein Schallsignal zu emittieren (oder im Fall eines Mikrophons aufzunehmen). Die Aktuatoren 10 und 12 bzw. das entsprechende Ansteuerungssignal ist so ausgelegt, dass jeweils benachbarte Aktuatorränder bzw. das freie Ende der Aktuatoren 10 und 12 eine nahezu identische Auslenkung aus der Ebene E1 erfahren. Die freien Enden sind mit den Bezugszeichen 10f und 12f gekennzeichnet. Da sich die Aktuatoren 10 und 12 bzw. die freien Ende 10f und 12f parallel zueinander bewegen, befinden sich selbige in Phase. Insofern wird die Auslenkung der Aktuatoren 10 und 12 als gleichphasig bezeichnet.

[0028] In der Folge bildet sich in der Gesamtstruktur aller Aktuatoren 10 und 12 im angetriebenen Zustand ein stetiges Auslenkungsprofil, welches lediglich durch die engen Entkopplungsschlitze 14 unterbrochen ist. Da die Spaltbreite der Entkopplungsschlitze im Mikrometer-Bereich liegt, werden hohe Viskoverluste an den Spaltseitenwänden 10w und 12w erreicht, so dass die hier durchtretende Luftströmung stark gedrosselt wird. Damit kann der dynamische Druckausgleich zwischen der Vorderseite und der Rückseite der Aktuatoren 10 und 12 nicht schnell genug erfolgen, so dass ein akustischer Kurzschluss unabhängig von der Aktuatorfrequenz reduziert wird. Dies bedeutet, dass sich eine eng geschlitzte Aktuatorstruktur im betrachteten akustischen Frequenzbereich strömungstechnisch wie eine geschlossene Membran verhält.

[0029] Fig. 1b zeigt eine weitere Variante, wie ein Aktuator eines mikromechanischen Schallwandlers ohne Abdichtung ein gutes Schalldruckverhalten erlangen kann. Das Ausführungsbeispiel aus Fig. 1b zeigt den Schallwandler 1' umfassend den Aktuator 10, der an dem Punkt 10e fest eingespannt ist. Der Biegeaktuator 10 kann aus einem Substrat (nicht dargestellt) herausgeätzt sein, sodass eine Kavität (nicht dargestellt) unter ihm geformt wird. Das freie Ende 10f kann über einen Bereich B zum Schwingen angeregt werden. Gegenüber dem freien Ende 10f ist ein vertikal angeordnetes Blendenelement 22 vorgesehen. Dieses Blendenelement ist bevorzugt zumindest so groß oder größer als der Bewegungsbereich B des freien Endes 10f. Die Blendenelemente 22 erstrecken sich bevorzugt auf der Vorder- und/oder Rückseite des Aktuator, d. h. also von der Ebene E1 (Substratebene) aus betrachtet in eine tiefer gelegene Ebene und eine höher gelegene Ebene (z.B. senkrecht zum Substrat). Zwischen dem Blendenelement 22 und dem freien Ende 10f ist ein Spalt 14' vergleichbar mit dem Spalt 14 aus Fig. 1a vorgesehen.

[0030] Das Blendenelement 22 ermöglicht die Breite der vorgesehenen Entkopplungsspalte 14' auch im ausgelenkten Zustand (vgl. B) annähernd gleich zu halten. Somit entstehen bei dieser Konfiguration mit den benachbarten Rändern keine signifikanten Öffnungen infolge der Auslenkung, wie beispielsweise in Fig. 1c dargestellt.

[0031] Fig. 1c zeigt einen Aktuator 10, der ebenfalls an dem Punkt 10e eingespannt ist. Gegenüber ist eine beliebig angrenzende Struktur 23 ohne vertikale Ausdehnung und ohne Bewegung vorgesehen. Infolge einer Auslenkung des Aktuators 10 stellt sich eine Öffnung im Bereich des freien Endes 10f des Aktuators ein. Diese Öffnung ist mit dem Bezugszeichen "o" versehen. Abhängig von der Auslenkung können diese Öffnungsquerschnitte 14o deutlich größer als die Entkopplungsschlitze (vgl. Fig. 1a und 1b) bzw. allgemein ein Kopplungsschlitz im Ruhezustand sein. Durch die Öffnung kann eine Luftströmung zwischen Vorder- und Rückseite vorkommen, was zu einem akustischen Kurzschluss führt.

[0032] Entsprechend Ausführungsbeispielen kann die Seitenfläche des Blendenelements 22 oder das Blendenelement 22 angepasst an die Bewegung des Aktuators 10 im Auslenkungsbereich B sein. Konkret wäre eine konkave Form denkbar.

[0033] Sowohl die Struktur 1 aus Fig. 1a als auch die Struktur 1' aus Fig. 1b ermöglicht den akustischen Kurzschluss dadurch zu verhindern, dass Mittel vorgesehen werden, die den Entkopplungsspalt 14 bzw. 14' über den gesamten Bewegungsbereich annähernd konstant halten.

[0034] Wie oben erläutert, kann entsprechend einem Ausführungsbeispiel ein piezoelektrisches Material verwendet werden. Fig. 2 zeigt in den Darstellungen a-c drei unterschiedliche Querschnitte möglicher Aktuatorelemente. In Fig. 2a ist eine unimorphe Struktur dargestellt. Hierbei ist auch eine passive Schicht 10p, 12p eine piezoelektrische Schicht 10pe bzw. 12pe aufgebracht.

[0035] Fig. 2b zeigt einen bimorphen Aufbau. Hierbei sind zwei piezoelektrische Schichten 10pe_1 bzw. 12pe_1 und 10pe_2 bzw. 12pe_2 sowie eine passive Zwischenschicht 10p bzw. 12p vorgesehen.

[0036] In Fig. 2c ist ein piezoelektrischer Schichtstapel mit je zwei piezoelektrischen Schichten 10pe_1 bzw. 12pe_1 und 10pe_2 und 12pe_2 gezeigt.

[0037] Alle gezeigten Piezoaktuatoren aus den Fig. 2a bis 2c haben also gemein, dass sie aus mindestens zwei Schichten, nämlich einer piezoelektrischen Schicht 10pe bzw. 12pe und einer weiteren Schicht, wie z. B. einer passiven Schicht 10p, 12p bzw. einer weiteren piezoelektrischen Schicht 10pe_2, 12pe_2 gebildet ist. Die piezoelektrischen Schichten 10pe, 12pe, 10pe_1, 12pe_1, 10pe_2, 12pe_2 können als Mehrschichtsysteme mit zusätzlichen Trennschichten (vgl. die Schichten 10p, 12p) ausgelegt sein und/oder selbst aus beliebig vielen Unterschichten (vgl. gestrichelte

Linien) gebildet sein. Die Kontaktierung erfolgt beispielsweise durch flächige oder interdigitale Elektroden.

[0038] Entsprechend einem alternativen Ausführungsbeispiel kann auch ein thermische Antrieb zum Einsatz kommen, der analog zu den piezoelektrischen Aktuatoren einen Mehrschichtaufbau aufweisen kann. Grundsätzlich entspricht dann der Aufbau eines thermischen Antriebs dem Aufbau, wie er in Bezug auf Fig. 2a-c für piezoelektrische Schichten erläutert ist, wobei statt piezoelektrischen Schichten thermisch aktive Schichten zum Einsatz kommen.

[0039] Bezug nehmend auf Fig. 3a-c werden verschiedene Aktuatoranordnungen, umfassend mindestens zwei gegenüberliegende Aktuatoren (vgl. Fig. 3b) erläutert.

[0040] Fig. 3a zeigt eine Aktuatoranordnung mit vier Aktuatoren 10', 11', 12' und 13'. Jeder dieser Aktuatoren 10' bis 13' ist dreieckig ausgeführt und einseitig entlang der Hypotenuse eingespannt. Die Dreiecke sind entsprechend einem Ausführungsbeispiel rechtwinklige Dreiecke, so dass die rechtwinkligen Spitzen der Aktuatoren 10' bis 13' alle in einem Punkt zusammentreffen. Infolgedessen erstrecken sich zwischen den Katheten jeweils die Rückkopplungsspalte 14.

[0041] Entsprechend Ausführungsbeispielen können die einzelnen Aktuatoren 10' bis 13' auch noch weiter untergliedert sein, wie mittels den gestrichelten Linien angedeutet ist. Bei Untergliederung ist natürlich dann die Einspannung nicht mehr entlang der Hypotenuse, sondern entlang einer der Katheten, während sich die Entkopplungsspalte dann entlang der Hypotenuse und entlang der anderen Kathete erstrecken.

[0042] Unabhängig davon, ob es sich um vier oder acht Aktuatoren handelt, ermöglicht die dreieckige Ausgestaltung, dass die benachbarten freien Enden (getrennt durch die jeweilige Spalte 14) eine möglichst gleiche Auslenkung erfahren.

[0043] Fig. 3b zeigt im Prinzip die Draufsicht des Ausführungsbeispiels aus Fig. 1a, wobei hier eben noch angedeutet ist, dass sowohl der Aktuator 10 als auch der Aktuator 12, z. B. entlang der Symmetrieachsen (vgl. gestrichelte Linie) untergliedert sein kann.

[0044] Fig. 3c zeigt eine weitere Ausführung, bei der der gesamte Schallwandler kreissegmentförmig angeordnet ist, und insgesamt vier 90°-Segmente als Aktuatoren 10" bis 13" aufweist, die wiederum durch die Separierungsspalte 14 voneinander getrennt sind. Bei diesem kreisrunden Schallwandler können die einzelnen Aktuatoren 10" bis 13" wiederum weiteruntergliedert sein, wie anhand der gestrichelten Linien angedeutet ist.

[0045] Alle Ausführungsbeispiele aus den Figuren 3a bis 3c haben gemeinsam, dass sie am Rand eingespannt sind, wie durch den jeweiligen Bereich 10e' bis 13e' bzw. 10e und 12e bzw. 10e" bis 13e" angedeutet ist.

[0046] Des Weiteren sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich, wie anhand der Ausführungsbeispiele aus Fig. 3a-3c gezeigt ist, die Separierungsspalte 14 bevorzugt entlang der Symmetrielinien erstrecken. Bei den Ausführungsbeispielen mit mehr als zwei Aktuatoren heißt das also, dass sich die Separierungsspalte gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel im Schwerpunkt der Gesamtfläche des Schallwandlers treffen.

[0047] Fig. 3d zeigt (in der Draufsicht) eine weitere Version eines mikromechanischen Schallwandlers mit vier (hier rechteckigen bzw. quadratischen) Aktuatoren 10''', 11''', 12''', und 13''', die in Form von vier Quadranten eines Rechtecks bzw. Quadrats angeordnet sind. Die vier Aktuatoren 10''' bis 13''' sind durch zwei sich kreuzende Separierungsspalte 14 voneinander getrennt. Jeder der Aktuatoren 10''' bis 13''' ist über Eck, d. h. zweiseitig am äußeren Rand eingespannt.

[0048] Bezug nehmend auf Fig. 4 wird dargestellt, welchen Einfluss die Spaltbreite hat. Fig. 4 zeigt den resultierenden Schalldruckpegel SPL über einen Frequenzbereich von 500 Hz bis 20 kHz für vier unterschiedliche Spaltbreiten (5 μm , 10 μm , 25 μm und 50 μm). In dem dargestellten Frequenzbereich wird die Reduktion des Schalldruckpegels SPL (akustischer Kurzschluss) für Spaltbreite von unter 10 μm vernachlässigbar und die Struktur verhält sich akustisch wie eine geschlossene Membran. Wie weiter zu erkennen ist, dass im höheren Frequenzbereich (z. B. oberhalb von 6000 Hz) der Einfluss der Spaltbreite signifikant abnimmt. Im Vergleich zu Systemen mit geschlossener Membran zeichnen sich die vorliegenden Systeme infolge der Entkopplung der einzelnen Aktuatoren durch eine deutlich höhere Effizienz aus. Letzteres äußert sich in sehr hohen Auslenkungen und Schalldruckpegeln. Darüber hinaus ergeben sich weitere Vorteile bezüglich der Linearität.

[0049] Bezug nehmend auf Fig. 5 wird nun ein Ausführungsbeispiel an einem entsprechenden weiteren Aspekt erläutert. Fig. 5 zeigt einen Aufbau von einem mikromechanischen Schallwandler 1" mit zwei Aktuatoren 10* und 12*. Die beiden Aktuatoren 10* und 12* umfassen jeweils eine innere Stufe und eine äußere Stufe. Das heißt also, dass der Aktuator 10* ein erstes Aktuatorelement 10a* (äußere Stufe) und ein zweites Aktuatorelement 10i* (innere Stufe) umfasst. Analog hierzu umfasst der Aktuator 12* das Aktuatorelement 12a* sowie das Aktuatorelement 12i*.

[0050] Wie hier dargestellt, sind immer die äußeren Stufen 10a* und 12a* eingespannt, nämlich über die Bereiche 10e* und 12e*. Das gegenüberliegende Ende der Aktuatoren 10a* und 12a* wird als freies Ende bezeichnet. An dieses freie Ende sind mittels optionaler Verbindungselemente 17 die inneren Stufen 10i* und 12i* angekoppelt. Die Ankopplung erfolgt derart, dass die Ankopplung beispielsweise wiederum über eine Ende der inneren Aktuatorelemente 10i* bzw. 12i* ausgeführt ist, nämlich so, dass die gegenüberliegenden Enden der inneren Aktuatoren 10i* bzw. 12i* als freie Enden dienen. In anderen Worten ausgedrückt heißt das also, dass der Aktuator 10* bzw. 12* derart aufgebaut ist, dass die innere Stufe 10i* (bzw. 12i*) gegenüber der äußeren Stufe 10a* (12a*) in Serie geschaltet ist.

[0051] Wie hier dargestellt, wird zwischen den freien Enden der Elemente 10i* und 12i* ein Entkopplungsspalt 14* ausgebildet. Dieser ist nicht zwingend für alle Ausführungsbeispiele so ausgeführt, wie der Entkopplungsspalt, welcher im Zusammenhang mit obigen Ausführungsbeispielen (vgl. Fig. 1a) erläutert wurde. Das heißt also, dass analog zu den

obigen Ausführungsbeispielen die Aktuatoren 10* und 12* lediglich über einen wenige Mikrometer breiten Entkopplungsspalt 14 voneinander getrennt sind und vorzugsweise so ausgelegt sind, dass jeweils benachbarte Strukturränder (freie Ränder der inneren Elemente 10e* und 12e*) im Betrieb möglichst gleiche Auslenkung (synchron bzw. gleichphasig) aus der Ebene E1 (in welcher die Aktuatoren 10* und 12* bzw. die Spannungsbereich 10e* und 12e* angeordnet sind) erfahren. Alternativ wäre eine Verbindung der inneren Elemente 10i* und 12i* im Bereich des dargestellten Spalts, z.B. mittels eines flexiblen Materials möglich.

[0052] Entsprechend optionalen Ausführungsbeispielen können die einzelnen kaskadierten Stufen auf einem Rahmen 19 aufliegen. In diesem Ausführungsbeispiel ist der Rahmen 19 derart angeordnet, dass die eingespannten Enden der inneren Stufen 10i* und 12i* auf demselben Rahmen 19 aufliegen. Allgemein heißt es aber, dass der Rahmen 19 bevorzugt so angeordnet ist, dass dieser im Bereich der Verbindungsstellen (vgl. Verbindungselemente 17) liegt. Der Rahmen ermöglicht es, parasitäre Schwingungsmoden sowie ungewollte mechanische Deformationen zu unterdrücken.

[0053] Auch wenn bei obigen Ausführungsbeispielen davon ausgegangen wurde, dass zwei Aktuatoren 10* und 12* mit jeweils innerer und äußerer Aktuatorstufe mit den Aktuatorelementen 10a*, 10i*, 12a*, 12i* vorgesehen sind, sei an dieser Stelle angemerkt, dass entsprechend weiteren Ausführungsbeispielen ein mikromechanischer Schallwandler mit nur einem Aktuator (z. B. der Aktuator 10*) geschaffen wird, der die erste Stufe 10a* und die zweite Stufe 10i* in entsprechender Serienanordnung aufweist. Dieser Aktuator kann beispielsweise gegenüber einem festen Ende frei schwingen, so dass ein Spalt dazwischen gebildet wird oder auch flexibel mit einem festen Ende verbunden sein. Entsprechend einem weiteren Ausführungsbeispiel wäre auch eine Blende, wie sie beispielsweise in Fig. 1b erläutert ist, denkbar.

[0054] Bezug nehmend auf Fig. 6a bis 6c werden drei ausführungsgemäße Schallwandler in der schematischen Draufsicht erläutert, bei denen die Konfigurationen aus Fig. 3a bis 3c um eben die Kaskadierung (zweistufiger Kaskadierungskonfigurationen) erweitert ist.

[0055] Fig. 6a zeigt einen mikromechanischen Schallwandler mit vier Aktuatoren 10** bis 13**, wobei jeder der Aktuatoren 10** bis 13** zwei Aktuatorelemente 10a** bzw. 10i** bis 13i** bzw. 13a** aufweist. Die inneren Elemente 10i** bis 13i** haben jeweils eine Dreiecksform (in Bezug auf die Fläche), während die äußeren Elemente 10a** bis 13a** eine Trapezform (bezogen auf die Fläche) aufweisen. Der kleinere Schenkel des trapezförmigen Aktuators 10a** bis 13a** ist mit dem Hypotenusenschenkel des dreieckförmigen Aktuators 10i** bis 13i** über Verbindungselemente 17 verbunden. In diesem Ausführungsbeispiel sind die optionalen Verbindungselemente bevorzugt an den Ecken des Trapezes bzw. des Dreiecks angeordnet.

[0056] Fig. 6b zeigt in einer Draufsicht im Wesentlichen den elektromechanischen Schallwandler aus Fig. 5 mit den inneren Aktuatoren 10i* und 12i* sowie den äußeren Aktuatoren 10a* und 12a*. Auch hier sind an den Ecken der rechteckigen inneren und äußeren Elemente 10i*, 10a*, 12i* und 12a* Verbindungselemente 17 vorgesehen.

[0057] Fig. 6c zeigt ausgehend von dem kreissegmentförmigen mikromechanischen Schallwandler die kaskadierten Aktuatoren 10*** bis 13***, wobei jeder Aktuator ein inneres Aktuatorelement und ein äußeres Aktuatorelement aufweist. Die inneren Aktuatorelemente 10i*** bis 13i*** sind als kreissegmentförmige Elemente ausgeführt, während die äußeren Elemente 10a*** bis 13a*** als Kreisscheibensegmente ausgeführt sind. Die Verbindung erfolgt wiederum über Verbindungselemente 17.

[0058] Alle Ausführungsbeispiele aus den Fig. 6a bis 6c haben gemein, dass entsprechend bevorzugten Ausführungsbeispielen die Aktuatoren 10* bis 13* bzw. 10** bis 12** bzw. 10*** bis 13*** durch Separierungsspalte 14 voneinander getrennt sind. Zusätzliche können auch noch Separierungsspalte 15 zwischen den inneren Aktuatoren (beispielsweise 10i** und 10a**) vorgesehen sein, die eben nur durch die Verbindungselemente 17 überbrückt werden. In anderen Worten ausgedrückt heißt das also, dass die äußeren Stufen (beispielsweise 10a* und 12a* in Fig. 6b) über jeweils mindestens ein Verbindungselement, vorzugsweise jedoch über zwei oder mehr voneinander beabstandeten Verbindungselemente 17, mit den zweiten inneren Stufen 10i* bzw. 12i* verbunden sind. Die Verbindungselemente können als mechanische Federelemente oder Gelenke ausgelegt sein.

[0059] Wie im Zusammenhang mit Fig. 3a-c erläutert, können die Aktuatoren auch weiteruntergliedert sein, so dass also beliebig viele Aktuatoren je Aktuatorelement 10* bzw. 12* entstehen (vgl. gestrichelte Linie).

[0060] Nachdem nun die Struktur der Schallwandler erläutert wurde wird nachfolgend auf deren Funktion eingegangen: Im angetriebenen Zustand lenken die Aktuatoren der äußeren Stufe die innere Stufe aus der Ebene aus, wobei die Aktuatoren der inneren Stufe eine weitere Auslenkung ausüben. Es resultiert eine ausgelenkte Struktur, die sich aufgrund der hohen viskosen Verluste in den Entkopplungsschlitz akustisch wie eine geschlossene Membran verhält.

[0061] Alternativ, kann die kaskadierte Gesamtstruktur auch drei oder mehr Stufen aufweisen. Die unterschiedlichen Stufen können wahlweise mit identischen oder verschiedenen Antriebssignalen angesteuert werden. Im Falle verschiedener Antriebssignale können die Stufen in unterschiedlichen Frequenzbereichen betrieben werden und z. B. einen Mehrwege-Schallwandler mit besonders geringem Platzbedarf bilden.

[0062] An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich das in Bezug auf Fig. 1b erläuterte Prinzip der Strömungsblenden auch auf die mehrstückigen kaskadierten Systeme erweitern lässt, z. B. um akustische Verluste zwischen Verbindungselementen und Aktuatoren oder Zwischenstufen zu minimieren.

[0063] Bezug nehmend auf die obigen Ausführungsbeispiele sei angemerkt, dass die in den Fig. 6a bis 6c erläuterten Varianten entsprechend zusätzlichen Ausführungsbeispielen beliebig kombinierbar sind. So ist beispielsweise es möglich, dass statt der vier inneren Aktuatorelemente 10a** bis 13a** aus Fig. 6a nur zwei innere Aktuatorelemente 10i* und 12i*, wie sie in Fig. 6b gezeigt sind, vorgesehen werden. Weiter ist es auch denkbar, dass nur ein inneres Aktuatorelement, z. B. auch in Kombination mit einer Blende (vgl. Ausführungsbeispiel aus Fig. 1b) vorgesehen wird.

[0064] Fig. 7 zeigt ein Diagramm des simulierten Schalldrucks über den Frequenzbereich, aufgeschlüsselt nach innerer und äußerer Stufe. Wie zu erkennen ist, dient die äußere Stufe besonders dem niedrigen Frequenzbereich (maximaler Schalldruck bei etwa 1500 Hz) während die innere Stufe dem höheren Frequenzbereich dient (maximaler Schalldruck bei etwa 10000 Hz). Bei dem hier vorliegenden Fall wurde von einem MEMS-Schallwandler mit einer Chipgröße von 1x1 cm ausgegangen und im Abstand von 10 cm gemessen.

[0065] Fig. 8 veranschaulicht das Konzept der Kaskadierung am Beispiel eines konkreten zweistufigen Designs. In Fig. 8a ist die Draufsicht gezeigt, wobei in Fig. 8b eine Ausschnittsvergrößerung des Verbindungsbereichs dargestellt ist.

[0066] Wie anhand der Fig. 8a zu erkennen ist, weist das zweistückige Design äußere Aktuatoren 10a** sowie innere Aktuatoren 10i** auf. Von der Konfiguration her ist das hier in Fig. 8a dargestellte Design dem Design aus Fig. 8a vergleichbar. Bei dem hier dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Entkopplungsschlitze 14 mit durchgezogenen Linien kenntlich gemacht. Wie insbesondere in der Vergrößerung aus Fig. 8b zu erkennen ist, sind auch zwischen den einzelnen Stufen jeweilige Entkopplungsschlitze 14 vorgesehen.

[0067] Im Gegensatz zu Fig. 6a ist hier bei dem Design aus Fig. 8a auch noch zusätzlich die Rahmenstruktur 19** illustriert, welche von den lateralen Abmessungen kleiner ist als die lateralen Abmessungen aller innenliegenden Stufen 10e**.

[0068] Wie anhand von Fig. 8b ersichtlich ist, dienen als Verbindungselemente 17** gefaltete Federn, deren Zwischenräume mit entkoppelten Füllstrukturen 17f**, z. B. aus einem Material von Feder oder Aktuator versehen sind. Analog dazu weisen auch die Zwischenräume 14 zwischen den Aktuatoren beider Stufen derartige Füllstrukturen 17f** auf.

[0069] In Fig. 9 ist ein mittels FEM-Simulation erhaltenes Auslenkungsprofil des Beispieldesigns aus Fig. 8a und b im dreidimensionalen Querschnitt gezeigt. Wie anhand der mittels Schraffuren illustrierten Auslenkungswerte illustriert ist, bildet sich trotz der Entkopplungsschlitze ein nahezu stetiges Auslenkungsprofil aus, das lediglich durch die schmalen Entkopplungsschlitze 14 unterbrochen ist.

[0070] Bezug nehmend auf Fig. 10 wird eine Erweiterung des Designs aus Fig. 1a sowie des Designs aus Fig. 1b erläutert. Die Konfiguration aus Fig. 10a ist vergleichbar mit der Konfiguration aus Fig. 1b, wobei das gegenüber dem einseitig eingespannten Aktuator 10 (vgl. Einspannung 10e) vorgesehene Blendenelement 22 nicht nur im Bereich des freien Endes 10f vorgesehen ist, sondern sich darüber hinaus auch noch entlang der Seiten des Aktuators, also entlang des gesamten Entkopplungsschlitzes 14 erstreckt. Die seitlich angeordneten Blendenelemente sind mit den Bezugszeichen 22s gekennzeichnet.

[0071] Fig. 10b geht von einer Schallwandlerkonfiguration mit zwei gegenüberliegenden Aktuatoren 10 und 12 aus, wie sie z. B. in Fig. 3b gezeigt ist. Hierbei handelt es sich wiederum um einseitig eingespannte Aktuatoren (vgl. Einspannung 10e bzw. 12e). Entlang der seitlichen Entkopplungsschlitze 14 erstreckt sich in diesem Ausführungsbeispiel ein vertikales angeordnetes Blendenelement 22s.

[0072] Sowohl das Ausführungsbeispiel aus Fig. 10a als auch das Ausführungsbeispiel aus Fig. 10b ermöglicht durch die Verwendung der seitlich angeordneten Blendenelemente 22s bei den hier dargestellten Strukturen mit unstetigen Auslenkungsprofilen eine gute fluidische Trennung von Vorder- und Rückseite.

[0073] Fig. 10c zeigt eine weitere Variante, bei der sich vier Aktuatoren 10''', 11''', 12''' und 13''' ausgehend von einer zentralen Fläche 16 erstrecken. Die vier Aktuatoren 10''' bis 13''' sind jeweils trapezförmig ausgeführt und werden über ihre kurze Seite einseitig gegenüber der Fläche 16 eingespannt. Die vier Aktuatoren 10''' bis 13''' sind über vier diagonal angeordnete Separierungsspalte 14 (welche sich als Verlängerung der Diagonalen der Fläche 16 erstrecken) voneinander separiert, so dass die lange Seite der Aktuatoren 10''' bis 13''' frei schwingen kann. Um eine "Abdichtung" gegenüber den Randbereichen zu ermöglichen, ist entlang der langen Seite der trapezförmigen Aktuatoren 10''' bis 13''' ein (umlaufendes) vertikal ausgebildetes Blendenelement 22s vorgesehen.

[0074] Fig. 12 zeigt einen mikromechanischen Schallwandler in Arrayform. Der hier dargestellte mikromechanische Schallwandler weist acht Schallwandler 1, wie sie beispielsweise in Bezug auf Fig. 1a erläutert wurden, auf. Diese acht Schallwandler 1 sind in zwei Reihen und vier Spalten angeordnet. Hierdurch kann eine großflächige Ausdehnung und damit ein hoher Schalldruck erreicht werden. Wenn man davon ausgeht, dass jeder Aktuator der Schallwandler 1 und eine Grundfläche 5 x 5 mm hat, so werden hiermit sozusagen 200 mm² "Membranfläche" realisiert. Allgemein ist der so dargestellte Schallwandler beliebig skalierbar, so dass auch Schallwandlergrößen von z.B. 1 cm Länge oder mehr (allgemein im Bereich von 1 mm bis 50 cm) erreicht werden können.

[0075] Auch wenn bei dem hier dargestellten Ausführungsbeispiel Fig. 12 exemplarisch der mikromechanische Schallwandler 1 aus Fig. 1a erläutert wurde, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass jegliche andere Schallwandler, wie sie oben erläutert wurden, wie z. B. der Schallwandler 1' aus Fig. 1b oder auch die kaskadierten Schallwandler aus Fig. 5 eingesetzt werden können. Auch sind andere Formen und Anordnungen denkbar.

[0076] Entsprechend weiteren Ausführungsbeispielen können die einzelnen oben erläuterten Aktuatoren mit Sensoren versehen werden. Die Sensoren ermöglichen die tatsächliche Auslenkung der Aktuatoren zu bestimmen. Diese Sensoren sind typischerweise mit der Steuerung der Aktuatoren verbunden, so dass um eine Feedbackschleife das Steuersignal für die einzelnen Aktuatoren derart nachgeregelt wird, dass die einzelnen Aktuatoren gleichphasig schwingen. Die Sensorik kann auch den Sinn haben, Nicht-Linearitäten aufzuspüren und bei der Ansteuerung das Signal derart zu verzerren, dass Nicht-Linearitäten kompensiert bzw. reduziert werden können.

[0077] Zum Hintergrund: Da die Aktuatoren gleichzeitig das schallerzeugendes Element bilden, lassen sich Alterungseffekte und Nichtlinearitäten im Betrieb direkt messen und ggf. elektronisch kompensieren. Dies stellt einen großen Vorteil gegenüber üblichen membranbasierten Systemen dar, bei denen entweder keine Sensorik vorhanden ist oder aber nur das Verhalten an den Antrieben, nicht jedoch an dem schallerzeugenden Membranelement detektiert werden kann.

[0078] Die Positionsdetektion erfolgt vorzugsweise über den piezoelektrischen Effekt. Hierfür können ein oder mehrere Bereiche der piezoelektrischen Schicht auf den Aktuatoren mit separaten Sensorelektroden versehen werden, über die ein näherungsweise zur Auslenkung proportionales Spannungs- oder Ladungssignal abgegriffen werden kann. Darüber hinaus können auch mehrere piezoelektrische Schichten realisiert werden, wobei zumindest eine Schicht partiell für die Positionsdetektion verwendet wird. Es ist auch eine Kombination verschiedener piezoelektrischer Materialien möglich, die entweder übereinander oder nebeneinander angeordnet sind (z. B. PZT für Aktuatoren, AlN für Sensoren).

[0079] Als Alternative zu piezoelektrischen Sensorelementen ist auch die Integration von Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen oder zusätzlichen Elektroden für eine kapazitive Positionserfassung möglich. Werden die Aktuatorstrukturen aus Silizium hergestellt, so lassen sich auch piezoresistive Silizium-Widerstände direkt integrieren.

[0080] Alle oben genannten Aspekte haben gemein, dass ein membranloses und vollständig zu MEMS-Herstellungsprozessen kompatibles Konzept zur Erzeugung von hohen Schalldrücken geschaffen wird. Alle Ausführungsbeispiele ermöglichen eine besonders geringe Baugröße. Die optionale Kaskadierung ermöglicht die Realisierung von integrierten Mehrweg-Schallwandlern. Die Steuerung kann entsprechend Weiterentwicklungen durch integrierte Positionssensoren derart ausgebildet sein, dass der emittierte Schall eine minimierte Verzerrung aufweist.

[0081] In nachfolgender Tabelle werden mögliche Materialien für die einzelnen Funktionselemente aufgezählt.

Funktion	Materialien
Piezoelektrische Schicht	PZT, PNZT, AlN, AlScN, ZnO, BCZT, KNN
Passive Schicht	Si, poly-Si, SiN, SiNO, SiO ₂ , AlN, Metalle
Rahmen	Si, Metalle, Glas, [piezoelektrische Schicht], [passive Schicht]
Blenden	Si, Metalle, Glas, Polymere, [piezoelektrische Schicht], [passive Schicht]
Verbindungselemente	[passive Schicht], [piezoelektrische Schicht]

[0082] Mögliche Abmessungen stellen sich wie folgt dar:

- Aktuatorfläche $50 \times 50 \mu\text{m}^2 - 5 \times 5 \text{cm}^2$
- Entkopplungsschlitz $0,1 \mu\text{m} - 40 \mu\text{m}$
- Auslenkungsamplitude $0.01 \mu\text{m} - 3 \text{mm}$

[0083] Derartige Wandler sind beispielsweise mit einem ersten Eigenmode von 10 Hz bis 300 kHz betreibbar. Die Anregungsfrequenz ist beispielsweise statisch bis 300 kHz gewählt.

[0084] Die beschriebenen Aktuator-Strukturen eignen sich für Anwendungsgebiete, in denen bei möglichst geringen Bauteilvolumina (< 10 cm³) Schall in einem Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 300 kHz erzeugt werden soll. Dies trifft in erster Linie auf miniaturisierte Schallwandler für Wearables, Smartphones, Tablets, Laptops, Kopfhörer, Hörgeräte aber auch Ultraschallwandler zu. Insgesamt kommen auch andere Anwendungen in Betracht, bei denen Fluide verdrängt werden (z. B. strömungsmechanische und aerodynamische Antriebs- und Führungsstrukturen, Inkjets).

[0085] Ausführungsbeispiele schaffen eine miniaturisierte Vorrichtung zur Verdrängung von Gasen und Flüssigkeiten mit mindestens einem aus der Ebene auslenkbaren Biegeaktor, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung enge Öffnungsschlitz mit derart großem Strömungswiderstand enthält, so dass die Vorrichtung sich im akustischen und Ultraschall-Frequenzbereich (20 Hz bis 300 kHz) strömungstechnisch annähernd wie eine geschlossene Membran verhält.

[0086] Gemäß weiteren Ausführungsbeispielen kann die Vorrichtung folgende Merkmale umfassen: Entkopplungsschlitz in den Aktuormaterialien, deren Gesamtlänge maximal 5% der gesamten Aktuatorfläche ausmachen und

ein mittleres Länge-zu-Breite-Verhältnis von über 10 aufweisen. Zusätzlich kann entsprechen Ausführungsbeispielen die Vorrichtung derart ausgelegt ist, dass im ausgelenkten Zustand entstehende Öffnungen weniger als 10% der gesamten Aktuatorfläche ausmachen, so dass auch ohne geschlossene Membran eine hohe fluidische Trennung zwischen Vorder- und Rückseite erzielt wird.

5 **[0087]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel kann die Vorrichtung zwei oder mehr gegenüberliegende voneinander separierte Aktuatoren aufweisen.

[0088] Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel können die Aktuatoren piezoelektrisch, elektrostatisch, thermisch, elektromagnetisch oder mittels einer Kombination mehrere Prinzipien angetrieben werden. Gemäß einem zusätzlichen Ausführungsbeispiel wäre es auch denkbar, dass die Vorrichtung mit zwei oder mehr über Verbindungselemente gekoppelten Aktuatorstufen ausgebildet ist.

10 **[0089]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel wäre es auch denkbar, dass die Vorrichtung zwei oder mehr Aktuatorstufen aufweist, die mit getrennten Signalen angesteuert werden und somit einen Zweizeige- oder Mehrwege-Schallwandler bilden.

[0090] Bezug nehmend auf das Ausführungsbeispiel aus Fig. 5 oder 6a bis c sei angemerkt, dass jedes Aktuatorelement 10a*, 12a*, 10i* und 12i* ein aktives, einzeln ansteuerbares Element ist. Dieses kann beispielsweise piezoelektrisch oder mit einem anderen hier erläuterten Prinzip betätigt werden.

[0091] Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel hat die Vorrichtung eine Rahmenstruktur zur Versteifung und Modenentkopplung.

20 **[0092]** Bei obigen Ausführungsbeispielen wurde die Aktuatoren insbesondere als einseitig eingespannte Aktuatoren erläutert. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass auch zweiseitige Einspannungen (vgl. Fig. 3d) oder allgemein mehrseitige Einspannungen denkbar wären.

[0093] Weitere Ausführungsbeispiele schaffen eine Vorrichtung mit Strömungsblenden zur Verringerung der Öffnungsquerschnitte zwischen Vorder- und Rückseite im ausgelenkten Zustand. Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel kann die Vorrichtung Sensorelemente zur Positionserfassung und -Regelung aufweisen.

25 **[0094]** Gemäß zusätzlichen Ausführungsbeispielen kann die Vorrichtung zur Schall- oder Ultraschallerzeugung in Luft (gasförmiges Medium) und das heißt also im Bereich von 20 Hz bis 300 kHz ausgebildet sein. Weitere Anwendungsgebiete sind die Erzeugung und Steuerung von Luftströmung, z. B. zur Kühlung.

[0095] Nachfolgend wird Bezug nehmend auf Fig. 11 ein mögliches Herstellungsverfahren von den obigen Schallwandlern erläutert. Das hier dargestellte Ausführungsbeispiel aus den Fig. 11a-d ermöglicht die Herstellung von dem Ausführungsbeispiel, wie es beispielsweise in Fig. 1b gezeigt ist. Durch geringfügige Abwandlung sind allerdings mit dem hier dargestellten Verfahren auch die Ausführungsbeispiele aus den weiteren Figuren, insbesondere aus Fig. 1a feststellbar.

[0096] In dem ersten in Fig. 11a dargestellten Schritt wird auf ein Substrat 48 eine passive Schicht 50p aufgebracht, bevor dann eine piezoelektrische Schicht 50pe mit zwei Elektroden 50e vorgesehen wird.

35 **[0097]** Bei dem Substrat 48 kann es sich um einen SOI-Wafer (Silicon on Insulator) handeln, der ein SI-Substrat umfasst. Auf dieses werden dann SiO₂-Schichten 50p mit dem in Fig. 1b gekennzeichneten Isolatoren 50pi und Si-Isolationsschichten, wie z. B. piezoelektrische Funktionsschichten (PZT) 50pe abgeschieden. Danach kann das Abscheiden der entsprechenden Metallelektroden (Pt, Au, Mo,) 50e erfolgen.

[0098] In einem nächsten Schritt, welcher in Fig. 11b dargestellt ist, werden dann die Elektroden 50e, die PZT 50pe sowie die Isolationsschicht 50p strukturiert. Hierdurch entstehend beispielsweise die Gräben 50g in der piezoelektrischen Schicht 50pe. Das Strukturieren kann durch Nass- oder Trockenätzen erfolgen. Je nach gewünschtem Produktdesign wird entweder der Schritt des Strukturierens bzw. Einbringens des Grabens 50g so ausgeführt, dass dieser nur minimale Abmessungen hat, um bei einem Resultat das Produkt aus Fig. 1a zu erzeugen oder größere Abmessungen haben, so dass dann das hier dargestellte Zwischenprodukt in Richtung des Produkts aus 1b entwickelt wird.

45 **[0099]** Um das Produkt aus Fig. 1a herzustellen, wird ein kleiner Graben 50g aufgebracht und dann der in Fig. 11c dargestellte Schritt übersprungen, um dann, wie in Fig. 11d dargestellt, die Rückseite durch ein ein- oder mehrstufiges Ätzverfahren zu öffnen und die beweglichen Strukturen freizustellen. Bei diesem Schritt wird das Substrat unterhalb der Passivierungsschicht 50p insbesondere im Bereich fluchtend zu den strukturierend piezoelektrischen Aktuatoren 50pe entfernt. Hierdurch entsteht die Kavität 48c.

50 **[0100]** Um ein Produkt, wie es in Bezug auf Fig. 1b erläutert ist, herzustellen, wird der optionale Schritt, der in Fig. 11c dargestellt ist, durchgeführt. Fig. 11c illustriert das Aufbringen der sich vertikal erstreckenden Blendenelemente 57. Diese werden hier in die Gräben 50g der piezoelektrischen Schicht 50pe eingebracht. Optional kann die laterale Position der Gräben 57 so gewählt sein, dass diese mit Bereichen der strukturierten Passivierungsschicht 50p fluchten, so dass beispielsweise das vertikale Blendenelement 75 die Wand eines Grabens in der passiven Schicht 50p verlängert. Das Aufbringen der Blendenelemente 57 kann beispielsweise durch galvanisches Abscheiden erfolgen und bevorzugt so, dass die Blendenelemente 57 aus der Schicht der piezoelektrischen Elemente 50p hinausragen.

55 **[0101]** Nach dem Aufbringen der Blendenelemente 57 erfolgt dann, wie oben bereits in Bezug auf das Ausführungsbeispiel aus Fig. 1a erläutert, das ein- oder mehrstufige Ätzen der Rückseite des Substrats 48, um die Kavität 48c

herzustellen. Wie hier illustriert, können einzelne Bereiche des Substrats 48 stehenbleiben, so dass innerhalb der Kavität 48c der Rahmen 48f gebildet wird. Dieser Rahmen entspricht dem beispielsweise in Fig. 5 erläuterten Rahmen 19.

[0102] Bei den erläuterten Herstellungsschritten können MEMS-Technologien übernommen werden, so dass das oben erläuterte Produkt mit herkömmlichen Herstellungsverfahren herstellbar ist.

[0103] Obwohl manche Aspekte im Zusammenhang mit einer Vorrichtung beschrieben wurden, versteht es sich, dass diese Aspekte auch eine Beschreibung des entsprechenden Verfahrens darstellen, sodass ein Block oder ein Bauelement einer Vorrichtung auch als ein entsprechender Verfahrensschritt oder als ein Merkmal eines Verfahrensschrittes zu verstehen ist. Analog dazu stellen Aspekte, die im Zusammenhang mit einem oder als ein Verfahrensschritt beschrieben wurden, auch eine Beschreibung eines entsprechenden Blocks oder Details oder Merkmals einer entsprechenden Vorrichtung dar.

[0104] Nachfolgend werden ausgehend von dem Basisausführungsbeispiel aus Fig. 1b unterschiedliche Implementierungen der Blende 22 erläutert. Bei allen nachfolgend diskutierten Ausführungsbeispielen wird davon ausgegangen, dass die diskutierte Blende 22*, 22^{etc} mit einem Spalt 14' von dem Biegeaktuator 10 (fest eingespannt an dem Bezugspunkt 10e) getrennt ist, so dass sich das freie Ende 10f des Biegeaktuators 10 entlang der vertikalen Ausdehnung des Blendenelements 22* bzw. 22^{etc} bewegen kann. Hierbei sei angemerkt, dass Aspekte der nachfolgend diskutierten Ausführungsbeispiele bzw. auch der bereits diskutierten Ausführungsbeispiele für die Blende beliebig miteinander kombiniert werden können (z. B. Deckel mit gerundeten/schrägen Seiten (Blenden)) oder asymmetrische Blende mit Deckel und Anschlag ...).

[0105] Fig. 13a zeigt einen schematischen Querschnitt einer Blendenstruktur. Hieran ist zu erkennen, dass die Blendenstruktur 22* aus mehreren Segmenten 22a*, 22b* und 22c* besteht. Das Segment 22a* erstreckt sich von der Substratebene (Ebene des Bezugspunkts 10e), in welcher der Biegeaktuator 10 z.B. in Ruhelage liegt, aus dem Substrat heraus, während das Segment 22b* in eben dieser angesprochenen Ebene des Bezugspunkts 10e liegt. Das Segment 22c* liegt in dem Substrat bzw. erstreckt sich von der Substratoberfläche in das Substrat hinein. Alle dargestellten Segmente 22a*, 22b*, 22c* können entsprechend Ausführungsbeispielen unterschiedliche Geometrien, d. h. Längs- und Querausdehnungen sowie auch variable Querschnitte aufweisen. Des Weiteren wäre es entsprechend weiteren Ausführungsbeispielen denkbar, dass die einzelnen Segmente 22a*, 22b* und 22c* auch unterschiedliche Materialien oder Materialausprägungen aufweisen. Beispielsweise kann das Segment 22c* sowie 22b* durch das Substrat selber geformt sein, während das Segment 22a* aufgewachsen ist.

[0106] Entsprechend weiteren Ausführungsbeispielen wäre es natürlich auch denkbar, dass mehr als die drei dargestellten Segmente 22a*, 22b* und 22c* vorgesehen sind.

[0107] Es sei angemerkt, dass die mittlere Position bei obigen und nachfolgenden Ausführungsbeispielen nicht zwingend der Ruhelage entsprechen muss, sondern auch beliebig nach oben oder unten verschoben sein kann (elektrisch oder mechanisch vorgespannt).

[0108] Fig. 13b zeigt eine weitere Ausprägung der Blendenstruktur, hier der Blendenstruktur 22**. Die Blendenstruktur 22** bzw. insbesondere das Segment, das sich aus der Substratebene heraus erstreckt, hat einen angeschrägten Querschnitt, der sich zu dem Aktuator 10 hin erstreckt. Hierdurch wird erreicht, dass der Spalt 14' eine relativ konstante Breite unabhängig von der Position des Aktuators 10 aufweist. Der Hintergrund hierzu ist, dass sich die Seite der Blendenstruktur 22**, die dem Aktuator 10 direkt gegenüberliegt in etwa entlang der Bewegungsbahn (Kreisbahn um den Fixpunkt 10e) erstreckt. Wie hier in Fig. 13b dargestellt, kann die Blende 22** entweder nur nach oben und/oder auch nach unten angeschrägt sein. Der hier dargestellte asymmetrische Aufbau ist also nur exemplarisch, so dass natürlich auch das untere Segment der Blendenstruktur 22** in analoger Weise angeschrägt sein kann, um eine symmetrische Struktur zu erreichen.

[0109] Dieses Ausführungsbeispiel der Blendenstruktur 22** mit der angeschrägten Innenseite hat den Vorteil, dass eine Spaltaufweitung bei größeren Amplituden verringert bzw. kompensiert werden kann. Eine Anschrägung kann aus herstellungstechnischer Sicht z. B. durch Anpassung des Lackprofils oder des Ätzprozesses realisiert werden.

[0110] Fig. 13c zeigt eine Weiterentwicklung der Blendenstruktur 22** aus Fig. 13b, nämlich die Blendenstruktur 22***. Die Blendenstruktur 22*** weist eine gebogene/abgerundete Innenseite auf. Diese Rundung erstreckt sich entlang der kreisbogenförmigen Bewegungsbahn des Aktuators 10 bzw. des freien Endes 10f des Aktuators 10. Auch wenn hier die abgerundete Innenseite nur auf der aus dem Substrat heraus erstreckenden Seite dargestellt ist, kann diese abgerundete Innenseite natürlich auch auf der Blendenstrukturseite in der Substratebene vorliegen. Analog zu dem Ausführungsbeispiel aus Fig. 13b wird durch Blendenstruktur 22*** mit der abgerundeten Innenseite die Spaltaufweitung bei großen Amplituden verringert bzw. kompensiert. Eine Abrundung kann aus herstellungstechnischer Sicht z. B. durch Anpassung des Lackprofils oder des Ätzprofils realisiert sein.

[0111] Fig. 13d zeigt eine weitere Blendenstruktur, nämlich die Blendenstruktur 22****. Hier weist der Querschnitt am Ende der Blendenstruktur 22**** eine Verbreiterung bzw. einen Überhang auf, der als mechanischer Anschlag für den Aktuator 10 bzw. das freie Ende 10f des Aktuators dient. Dieser Anschlag ermöglicht vorteilhafterweise einen mechanischen Überlastschutz.

[0112] Fig. 13e zeigt eine weitere Blendenstruktur 22*****, bei welcher die Blendenstruktur 22***** asymmetrisch

aufgebaut ist. Hintergrund hierzu ist, dass es Aktuatoren 10 gibt, die primär einseitig ausgelenkt werden, so dass eine vertikale Ausdehnung der Blende 22***** in eine Richtung, hier in der Richtung aus der Substratebene heraus reicht. Auch wenn hier die Auslenkung des Aktuators 10 bzw. die Ausdehnung der Blendenstruktur 22***** nach oben (aus der Substratebene heraus) dargestellt ist, so kann entsprechend Ausführungsbeispielen dies selbstverständlich auch umgekehrt sein, d. h. also, dass sich beide Elemente in das Substrat herein erstrecken. Hierbei sei angemerkt, dass die Verschiebung der Ruhelage des Aktuators durch einen elektrischen Offset im Ansteuersignal oder einem mechanischen Vorsprung (z. B. Schichtstress in Aktuatorschichten) realisiert sein kann.

[0113] Fig. 13f zeigt ein Beispiel für eine Blendenstruktur 22***** mit einer geringen Ausdehnung. Die Blendenstruktur 22***** kann dann so flach realisiert sein, wenn die Auslenkung des Aktuators (10) gering ist. Beispielsweise liegt die Höhenausdehnung der Blende 22***** im Bereich der Aktuatordicke. Diese Variante hat Vorteile bezüglich der Herstellung, da auf zusätzlich aufgebrachte Blendenstrukturbereiche verzichtet werden kann.

[0114] Fig. 13g zeigt ein Beispiel für eine Blendenstruktur 22*****, die einerseits aus einem Substratbereich 23s sowie dem eigentlichen Blendenelement 22***** besteht. Die obere Blendenstruktur 22***** kann z. B. als galvanisch aufgebautes Metall oder als Polymer (SU8, BCB, ...) oder auch aus Glas oder Silizium hergestellt sein. Die untere Blendenstruktur 23s besteht primär aus dem Substrat (z. B. Silizium oder Glas) selbst und kann entsprechend weiteren Ausführungsbeispielen mit zusätzlichen Schichten versehen sein.

[0115] Fig. 13h zeigt eine weitere Blendenstruktur ohne ein zusätzlich aufgebrachtes Element. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Biegeaktuator 10 insbesondere in die Substratebene hinein schwingt, so dass auf ein Blendenelement, das aus der Substratebene herausragt, verzichtet werden kann. Hier besteht also das Blendenelement aus dem Substratelement 23s, das die untere Blendenstruktur bildet. An dieser Stelle sei angemerkt, dass, wie bereits oben erläutert, die Ruhelage des Aktuators 10 über mechanische Vorspannung oder einen elektrischen Offset nach unten verschoben werden kann, so dass das hier gebildete Blendenelement 23s ausreicht. In dem Betrieb kann der Aktuator lediglich nach unten ausgelenkt werden, so dass keine Blende nach oben benötigt wird und dann der Herstellungsaufwand reduziert wird.

[0116] Fig. 13i zeigt eine weitere Blendenstruktur 22*****, die im Wesentlichen aus einer dünnen auf das Substratelement 23s aufgebrachten Schicht besteht. Je nach gewünschter Aktuatorauslenkung kann die Schichtdicke des Blendenelements 22***** im Bereich der Aktuatordicke liegen. Das Substrat 23s kann (muss aber nicht) zusätzlich als Blendenstruktur wirken und bündig mit der Blendenstruktur 22***** abschließen oder auch einen Versatz aufweisen.

[0117] Bezugnehmend auf Fig. 14a bis 14c werden weitere Ausführungsbeispiele erläutert, bei welchen der mikro-mechanische Schallwandler um ein weiteres Substrat 220a, 220b und 220c (Deckel) erweitert ist. Entsprechend Ausführungsbeispielen formt das weitere Substrat 220a, 220b, 220c die Blendenstruktur.

[0118] Fig. 14a zeigt ein als Deckel ausgeführtes Substrat 220a, der auf ein Substrat 23s oberhalb einer Kavität 23k des Biegeaktuator 10 aufgesetzt ist, so dass der Biegeaktuator 10 innerhalb des Deckels 220a bzw. innerhalb des Raumes definiert durch den Deckelinnenraum 220a und die Kavität 23 schwingen kann. Der Deckel 220a ist an der Seite gegenüberliegend zu dem freien Ende derart angeordnet, dass die Innenseitenwand des Deckels 220a von dem Ende 10e durch den Spalt 140 getrennt ist. Da in diesem Ausführungsbeispiel der Deckel 220a vollständig geschlossen ist, emittiert der Biegeaktuator 10 beispielsweise den Schall durch die Kavität 23k.

[0119] Bei diesem Ausführungsbeispiel sei darauf hingewiesen, dass bei allen obigen Ausführungsbeispielen bzw. bei der Erläuterung derer im Wesentlichen davon ausgegangen wird, dass der Schall aus dem Substrat heraus emittiert wird. Selbstverständlich ist es entsprechend Ausführungsbeispielen auch denkbar, dass, der Schall durch das Substrat bzw. durch eine Kavität des Substrats hinausgeführt wird.

[0120] An dieser Stelle sei angemerkt, dass Fig. 14a einen Querschnitt durch das Substrat 220a darstellt, wobei sich das weitere Substrat beispielsweise kreisförmig oder eckig um den Biegeaktuator 10 erstreckt, um für diesen ein (Rück-) Volumen oder allgemein eine Abdeckung zu schaffen. Aus herstellungstechnischer Sicht sei angemerkt, dass der Deckel 220a beispielsweise durch ein zweites strukturiertes Substrat (also ein Substrat mit einer Kavität) (vgl. Bezugszeichen 221k) hergestellt sein kann. Dieses zweite Substrat wird dann auf das Substrat mit dem Biegeaktuator 10 aufgebracht, so dass die Kavität 221k mit der Kavität 23 zumindest bereichsweise (im Bereich des Spalts 140) fluchtet.

[0121] Fig. 14b zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel mit einem modifizierten Deckel 220b, wobei hinsichtlich des restlichen Aufbaus von demselben Aktuator 10 und dem Substrat 23s ausgegangen wird. Der Deckel 220b unterscheidet sich von dem Deckel 220a dadurch, dass dieser optionale Schallöffnungen 222o bzw. 222s aufweist. Die Schallöffnung 222o bzw. die mehreren Schallöffnungen 222o sind auf der Hauptoberfläche des Deckels 220b aufgebracht, während die Öffnung 222s seitlich vorgesehen ist. An dieser Stelle sei angemerkt, dass es entsprechend Ausführungsbeispielen auch ausreicht, dass eine Öffnung, entweder die Öffnung 222o oder die Öffnung 222s vorgesehen wird. Durch diese Öffnungen 222o bzw. 222s kann das eingeschlossene Luftvolumen in der Kavität 221k ventiliert werden. Die Öffnungen können dem Schallaustritt dienen oder einen Druckausgleich ermöglichen. Mehrere Öffnungen können zusammen ein oder mehrere Gitterstrukturen bilden, die den Aktuator vor mechanischen Einwirkungen und Staub schützen.

[0122] Fig. 14c zeigt einen weiteren Schallwandler mit einem Deckel 220c, der eine Öffnung 222o aufweist. Der Biegeaktuator ist auf einem weiteren Substrat 230s vorgesehen, das eine seitliche Öffnung 232s aufweist. Das Substrat

230s ist auf ein weiteres Substrat 233s bzw. einen Deckel 233s aufgebracht, so dass die Kavität 230k abgeschlossen wird. Dieses weitere Substrat 233s kann ebenfalls optionale Schallöffnungen 233o aufweisen. Hierdurch wird ein geschlossenes bzw. über zumindest eine der optionalen Öffnungen 232s, 233o, 222o ventiliertes Volumen gebildet. Das Volumen ist im Wesentlichen durch die Kavitäten 221k sowie 230k gebildet und über zumindest eine oder mehrere Öffnungen geöffnet. Die Öffnungen können zum Schallaustritt dienen oder einen Druckausgleich ermöglichen. Mehrere Öffnungen können zusammenwirken und eine oder mehrere Gitterstrukturen bilden, die den Aktuator 10 vor mechanischer Einwirkung und Staub schützen.

[0123] Nachfolgend werden Bezug nehmend auf die Figuren 15a bis 15h unterschiedliche Aktuatorgeometrien erläutert die gegenüber den Geometrien aus Fig. 10 erweitert sind. Bei Darstellungen ist der Aktuator mit dem Bezugszeichen 100 bzw. 100_1 bis 100_4 versehen, während die Blende mit dem Bezugszeichen 225 versehen ist. Zwischen Aktuator und Blende erstreckt sich immer ein Koppelschlitz, der mit dem Bezugszeichen 140 versehen ist.

[0124] Es soll erwähnt werden, dass bei Ausführungsbeispielen die Aktuatorgeometrie beliebig miteinander kombiniert werden können (z. B. Fig. 15f mit abgerundeten oder dreieckigen Aktuatoren).

[0125] Fig. 15a zeigt eine Draufsicht auf einen abgerundeten Aktuator 100, während Fig. 15b eine Draufsicht auf einen dreiecksförmigen Aktuator 100 zeigt. Gleiche oder auch unterschiedliche Aktuatoren 100 lassen sich beliebig miteinander kombinieren, wie beispielsweise anhand von Fig. 15c, 15d und 15e dargestellt ist.

[0126] Fig. 15c zeigt hier dreiecksförmige Aktuatoren 100_1 bis 100_4, die in Summe eine viereckige Fläche beschreiben, wobei durch eine kreuzförmig angeordnete Blendenstruktur 225 die vier Aktuatoren 100_1 bis 100_4 voneinander separiert sind. Zwischen Aktuatoren 100_1 bis 100_4 und der Blendenstruktur 225 ist wiederum der Schlitz 145 vorgesehen. Alternativ wären auch Anordnungen mit 3, 5, 6 ... Aktuatoren denkbar. Weiter sei angemerkt, dass die Gesamtfläche nicht zwingend viereckig sein muss, sondern auch mehreckig sein kann.

[0127] Fig. 15d zeigt zwei gegenüberliegende viereckige Aktuatoren 100_5 und 100_6, die ein Viereck beschreiben. Die viereckigen Aktuatoren bilden 100_5 und 100_6 jeweils drei freie Ecken, die durch die H-förmige Blende 225 mit zugehörigem Schlitz 140 begrenzt sind.

[0128] Fig. 15e zeigt vier kreissegmentförmige Aktuatoren 100_7 bis 100_10, die ähnlich wie bei Fig. 15c durch eine kreuzförmige Blende 225 mit Schlitz 140 voneinander getrennt sind.

[0129] Bei der Variante von Fig. 15c ist die Hypotenuse jedes dreiecksförmigen Aktuators 100_1 bis 100_4 eingespannt, während bei dem Ausführungsbeispiel aus Fig. 15e jeweils das Kreissegmentbögen 100_7 bis 100_10 fest eingespannt ist. Alternativ wären auch Anordnungen mit 3, 5, 6 ... Aktuatoren denkbar. Weiter sei angemerkt, dass die Gesamtfläche nicht zwingend viereckig sein muss, sondern auch mehreckig sein kann.

[0130] Durch die Kombination unterschiedlicher Aktuatoren lassen sich z. B. Mehrwegsysteme realisieren, wie anhand der Fig. 15f, Fig. 15g und Fig. 15h gezeigt ist.

[0131] Fig. 15f kombiniert z.B. drei unterschiedlich geformte, aber jeweils viereckige Aktuatoren 100_11 bis 100_13, die jeweils an einer der vier Seiten eingespannt sind, wobei drei der vier Seiten freie Enden ausbilden. Zwischen den freien Enden ist eine labyrinthförmige Blende 225 vorgesehen, die unter Verwendung von den Schlitz 140 die Aktuatoren 100_11 bis 100_13 trennen. Alle Aktuatoren 100_11 bis 100_13 haben z.B. unterschiedliche Größe (Fläche) und können so für unterschiedliche Frequenzbereiche ausgelegt sein.

[0132] Fig. 15g zeigt zwei Aktuatoren 100_14 und 100_15, wobei der erste 100_14 ein viereckiger kleiner Aktuator ist. Der weitere, größeren Aktuator 100_15 ist ebenfalls viereckig, weist aber eine Aussparung 100_15a für den anderen Aktuator 100_14 auf. Die Aussparung 100_15a ist so angeordnet, dass beide Aktuatoren auf derselben Seite eingespannt sind. Durch einen zwischen den zwei Aktuatoren 100_14 und 100_15 vorgesehenen Schlitz 140 können diese Aktuatoren 100_14 und 100_15 in ihrer Bewegung entkoppelt sein. Der größere Aktuator 100_15 kann beispielsweise für den Tieftonbereich genutzt werden, während der innere Aktuator 100_14 für den Hochtonbereich genutzt werden kann.

[0133] Fig. 15h zeigt einen ähnlichen Aufbau der Aktuatoren 100_14 und 100_15, wobei zusätzlich zu der Trennung mittels des Schlitzes 140 der zwei Aktuatoren 100_14 und 100_15 auch noch eine weitere Blende 225 vorgesehen ist. Beide Ausführungsbeispiele (Fig. 15g und 15h) haben gemein, dass zumindest entlang der freien Enden des großen Aktuators 100_15 mit der Aussparung 100_15a, in welcher der kleine Aktuator 100_14 angeordnet ist, die Blenden 225 samt Schlitz 140 angeordnet sind. Durch eine derartige innere Verschachtelung bzw. Vorsehung größerer und kleinerer Aktuatoren ist es allgemein möglich, unterschiedliche Frequenzbereiche mit unterschiedlichen Aktuatoren abzudecken.

[0134] Fig. 16 zeigt eine schematische Draufsicht auf einen zweiseitig oder mehrseitig eingespannten (vgl. Bereiche 10e1 und 10e2) Biegeaktuator 10**, der zumindest eine freie Seite 10f** hat (hier 2). Diese freie Seite 10f** kann, wie oben erläutert durch eine gegenüberliegende Blende 22** (hier 2, entsprechend der erläuterten Varianten) mit dazwischen liegenden Spalt 14 ** akustisch separiert sein.

[0135] Bei obigen Ausführungsbeispielen wurde insbesondere davon ausgegangen, dass ein Schallwandler zur Emission von Schall (Lautsprecher) geschaffen werden soll, weshalb auch immer von einem Biegeaktuator gesprochen wurde. Selbstverständlich ist das Prinzip auch umkehrbar, sodass durch den Schallwandler entsprechend einem Ausführungsbeispiel ein Mikrophon gebildet wird, bei dem der Biegeaktuator (vgl. Biegeaktuator) ausgebildet ist, z. B. durch Luft, zur (z. B. vertikalen) Schwingung angeregt zu werden, um in Abhängigkeit hierzu ein elektrisches Signal auszugeben

(allgemein die akustischen Wellen aus der Umgebung zu detektieren). Entsprechend einem weiteren Ausführungsbeispiel wird ein Bauelement geschaffen, das sowohl Lautsprecher und Mikrofon auf Basis oben erläuterten Konzepte umfasst. Hier können die beiden Bauelemente auf dem selben Substrat geformt sein, was aus Fertigungssicht vorteilhaft ist.

5 **[0136]** Im Folgenden werden zusätzliche Ausführungsbeispiele und Aspekte der Erfindung beschrieben, die einzeln oder in Kombination mit beliebigen der hierin beschriebenen Merkmale, Funktionalitäten und Einzelheiten verwendet werden können.

[0137] Gemäß einem ersten Aspekt kann ein mikromechanischer Schallwandler 1, 1', 1", der in einem Substrat aufgebaut ist, folgende Merkmale aufweisen: einen ersten Biegewandler 10, der sich entlang einer Ebene des Substrats erstreckt und ein freies Ende 10f oder eine freie Seite aufweist und ausgebildet ist, zur vertikalen Schwingung angeregt zu werden, um einen Schall zu emittieren oder aufzunehmen; und ein sich vertikal zu dem ersten Biegewandler 10 erstreckendes Blendenelement 22, das durch einen Spalt 14 von dem freien Ende 10f oder der freien Seite des ersten Biegewandlers 10 getrennt ist.

15 **[0138]** Gemäß einem zweiten Aspekt unter Bezugnahme auf den ersten Aspekt kann das Blendenelement 22 aus der Ebene des Substrats herausragen.

[0139] Gemäß einem dritten Aspekt unter Bezugnahme auf den zweiten Aspekt kann das Blendenelement 22 aus einem unbeweglichen Bereich des Substrats herausragen.

[0140] Gemäß einem vierten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis dritten Aspekts kann der erste Biegewandler 10 aus der Ebene des Substrats heraus zum Schwingen anregbar sein oder senkrecht zu der Ebene des Substrats zum Schwingen anregbar sein.

20 **[0141]** Gemäß einem fünften Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis vierten Aspekts kann die Höhe des Blendenelements 22 mindestens 50% oder mindestens 100% der maximalen Auslenkung des ersten Biegewandlers 10 im linearen Betrieb oder der maximalen elastischen Auslenkung des ersten Biegewandlers 10 betragen oder mindestens 3-mal eine Breite des Spalts 14 oder mindestens 1-mal eine Dicke des Biegewandlers 10 oder mindestens 0,1% oder 1% der Länge Biegewandlers 10.

[0142] Gemäß einem sechsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis fünften Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" ein vertikal zu dem ersten Biegewandler 10 erstreckendes Blendenelement 22 umfassen, das durch einen Spalt 14 von den beweglichen Seiten des ersten Biegewandlers 10 getrennt ist.

30 **[0143]** Gemäß einem siebten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis sechsten Aspekts kann das Blendenelement 22 in seinem Querschnitt eine variierende Geometrie aufweisen.

[0144] Gemäß einem achten Aspekt unter Bezugnahme auf den siebten Aspekt kann die Geometrie derart variieren, dass eine dem Biegewandler 10 zugewandte Fläche entlang einer Bewegungsbahn des freien Endes bei einer vertikalen Schwingung des Biegewandlers 10 gekrümmt oder geneigt ist.

35 **[0145]** Gemäß einem neunten Aspekt unter Bezugnahme auf den siebten oder achten Aspekt kann das Blendenelement 22 einen mechanischen Anschlag für den Biegewandler 10 aufweisen.

[0146] Gemäß einem zehnten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis neunten Aspekts kann sich das Blendenelement 22 asymmetrisch aus der Ebene des Substrats heraus und in die Ebene des Substrats herein erstrecken.

40 **[0147]** Gemäß einem elften Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis neunten Aspekts kann sich das Blendenelement 22 symmetrisch aus der Ebene des Substrats heraus und in die Ebene des Substrats hereinerstrecken; und/oder wobei das Blendenelement 22 eine ausgehend von der Ruhelage des Biegewandlers 10 gleiche Höhenausdehnung aus der Ebene des Substrats heraus und in die Ebene des Substrats herein aufweisen kann.

[0148] Gemäß einem zwölften Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis elften Aspekts kann das Substrat eine Blendenstruktur oder einen Teil der Blendenstruktur innerhalb des Substrats formen.

45 **[0149]** Gemäß einem dreizehnten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis zwölften Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" einen Deckel aufweisen, der im Bereich des ersten Biegewandlers 10 auf das Substrat aufgesetzt ist, so dass zumindest der erste Biegewandler 10 sowie das Blendenelement 22 durch den Deckel oder das erste Substrat 233s bedeckt sind.

[0150] Gemäß einem vierzehnten Aspekt unter Bezugnahme auf den dreizehnten Aspekt kann der Deckel 220a, 220b, 220c das Blendenelement 22 ausbilden.

50 **[0151]** Gemäß einem fünfzehnten Aspekt unter Bezugnahme auf den dreizehnten oder vierzehnten Aspekt kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" in dem Deckel eine oder mehrere Öffnungen aufweisen; und/oder kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" in dem Substrat eine oder mehrere Schallöffnungen aufweisen.

[0152] Gemäß einem sechzehnten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis fünfzehnten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" einen zweiten Biegewandler 12 mit einem freien Ende umfassen, welcher mit dem ersten Biegewandler 10 in einer gemeinsamen Ebene e1 angeordnet ist, und das Blendenelement 22 zwischen dem freien Ende des ersten Biegewandlers 10 und dem freien Ende des zweiten Biegewandlers angeordnet sein.

55 **[0153]** Gemäß einem siebzehnten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis sechzehnten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" einen zweiten Biegewandler 12 umfassen, welcher ein freies Ende 12f

aufweist und mit dem ersten Biegewandler 10 in einer gemeinsamen Ebene e1 angeordnet ist, so dass das freie Ende 10f des ersten Biegewandlers 10 von dem freien Ende 10f des zweiten Biegewandlers 12 durch einen Spalt 14 getrennt ist, wobei der zweite Biegewandler 12 phasengleich zu der vertikalen Schwingung des ersten Biegewandlers 10 angeregt wird.

5 **[0154]** Gemäß einem achtzehnten Aspekt unter Bezugnahme auf den siebzehnten Aspekt können der erste und zweite Biegewandler 10, 12 gleichartige Biegewandler sein.

[0155] Gemäß einem neunzehnten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis sechszehnten Aspekts können der erste und/oder zweite Biegewandler 12 ein flächiger, trapezförmiger oder rechteckiger Biegewandler sein.

10 **[0156]** Gemäß einem zwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis neunzehnten Aspekts können der erste und/oder zweite Biegewandler 10, 12 ein dreieckiger oder kreissegmentförmiger oder abgerundeter Biegewandler sein.

[0157] Gemäß einem einundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des siebzehnten bis neunzehnten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" einen oder mehrere weitere Biegewandler umfassen, die in der gemeinsamen Fläche angeordnet sind, so dass deren freie Enden von den freien Enden 10f, 12f des ersten und/oder zweiten Biegewandlers 10, 12 durch einen Spalt 14 getrennt sind, wobei der zumindest eine weitere Biegewandler phasengleich zu der vertikalen Schwingung des ersten und/oder zweiten Biegewandlers 10, 12 zur vertikalen Schwingung angeregt wird.

15 **[0158]** Gemäß einem zweiundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des siebzehnten bis einundzwanzigsten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" eine Steuerung umfassen, die den ersten und zweiten Biegewandler 12 so ansteuert, dass diese phasengleich zur vertikalen Schwingung angeregt werden.

[0159] Gemäß einem dreiundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis zweiundzwanzigsten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" eine Sensorik umfassen, die ausgebildet ist, um die vertikale Schwingung und/oder die Position des ersten und/oder des zweiten Biegewandlers 12 zu erfassen.

20 **[0160]** Gemäß einem vierundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis dreiundzwanzigsten Aspekts kann der Spalt 14 kleiner 10% oder kleiner 5% oder kleiner 1% oder kleiner 0,1% oder kleiner 0,01% der Fläche des ersten Biegewandlers 10 sein.

[0161] Gemäß einem fünfundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis vierundzwanzigsten Aspekts kann der Spalt 14 bei Auslenkung kleiner 15% oder kleiner 10%, 5%, 1%, 0,1% oder 0,01% der Fläche des ersten Biegewandlers 10 sein.

30 **[0162]** Gemäß einem sechsundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis fünfundzwanzigsten Aspekts kann der Spalt 14 im Ruhezustand des ersten Biegewandlers 10 bestehen.

[0163] Gemäß einem siebenundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis sechsundzwanzigsten Aspekts kann der erste Biegewandler 10 einseitig oder mehrseitig gegenüber dem Substrat und/oder einem Grundelement eingespannt sein.

35 **[0164]** Gemäß einem achtundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis siebenundzwanzigsten Aspekts kann der erste Biegewandler 10 oder ein zweiter Biegewandler 12 jeweils ein erstes und ein zweites Biegeelement umfassen, die in Serie geschaltet sind, um so den jeweiligen Biegewandler zu formen.

[0165] Gemäß einem neunundzwanzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den achtundzwanzigsten Aspekt kann das erste Biegeelement ein eingespanntes Ende und ein freies Ende 10f aufweisen und das zweite Biegeelement mit seinem eingespannten Ende an das freie Ende 10f des ersten Biegeelements 10 angreifen und mit seinem freien Ende 10f das freie Ende 10f, 12f des ersten und/oder zweiten Biegewandlers 12 formen.

40 **[0166]** Gemäß einem dreißigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den achtundzwanzigsten oder neunundzwanzigsten Aspekt kann das erste Biegeelement über ein flexibles Element mit dem zweiten Biegeelement verbunden sein.

[0167] Gemäß einem einunddreißigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des achtundzwanzigsten bis dreißigsten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler einen Rahmen aufweisen.

45 **[0168]** Gemäß einem zweiunddreißigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den einunddreißigsten Aspekt kann der Rahmen im Bereich des Übergangs zwischen dem ersten und dem zweiten Biegeelement angeordnet sein.

[0169] Gemäß einem dreiunddreißigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des achtundzwanzigsten bis zweiunddreißigsten Aspekts können das erste Biegeelement und das zweite Biegeelement mit unterschiedlichen Steuersignalen angesteuert werden.

50 **[0170]** Gemäß einem vierunddreißigsten Aspekt kann ein Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Schallwandlers, der in einem Substrat aufgebaut ist, mit einem sich entlang einer Ebene des Substrats erstreckenden, ersten Biegewandler 10, und einem vertikal zu dem ersten Biegewandler 10 erstreckenden Blendenelement 22, folgende Schritte aufweisen: Strukturieren einer Schicht, um den ersten Biegewandler 10 zu formen, so dass er ein freies Ende 10f oder eine freie Seite aufweist und ausgebildet ist, zur vertikalen Schwingung angeregt zu werden, um einen Schall zu emittieren oder aufzunehmen; und Realisierung des vertikalen Blendenelements 22, so dass dieses über die Schicht des ersten Biegewandlers 10 hinausragt und durch einen Spalt 14 von dem freien Ende 10f des ersten Biegewandlers 10 getrennt ist.

- 5 **[0171]** Gemäß einem fünfunddreißigsten Aspekt kann ein mikromechanischer Schallwandler 1, 1', 1" einen ersten Biegewandler 10, der ein freies Ende 10f oder eine freie Seite hat und ausgebildet ist, zur vertikalen Schwingung angeregt zu werden, um einen Schall zu emittieren oder aufzunehmen, aufweisen; wobei der erste Biegewandler 10, 12 ein erstes und ein zweites Biegeelement umfassen kann, die in Serie geschaltet sind, um so den ersten Biegewandler zu formen, wobei das erste Biegeelement mit jeweils einem ersten Steuersignal und das zweite Biegeelement mit einem zweiten Steuersignal ansteuerbar sind.
- [0172]** Gemäß einem sechsunddreißigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den fünfunddreißigsten Aspekt kann sich das erste Steuersignal von dem zweiten Steuersignal unterscheiden.
- 10 **[0173]** Gemäß einem siebenunddreißigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den sechsunddreißigsten Aspekt können das erste Steuersignal und das zweite Steuersignal von einem gemeinsamen Ursprungssignal abgeleitet sein und das erste Steuersignal gegenüber dem zweiten Steuersignal modifiziert sein.
- [0174]** Gemäß einem achtunddreißigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den sechsunddreißigsten oder siebenunddreißigsten Aspekt kann das erste Steuersignal einen von dem zweiten Steuersignal unterschiedlichen oder teilweise überlappenden Frequenzbereich aufweisen oder können das erste Steuersignal und das zweite Steuersignal von einem gemeinsamen Ursprungssignal abgeleitet sein und das erste Steuersignal eine andere Frequenzfilterung erfahren haben als das zweite Steuersignal.
- 15 **[0175]** Gemäß einem neununddreißigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den achtunddreißigsten Aspekt kann das erste Steuersignal einen niedrigeren Frequenzbereich haben als das zweite Steuersignal.
- [0176]** Gemäß einem vierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis neununddreißigsten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" einen zweiten Biegewandler 12, der ein freies Ende 12f hat und mit dem ersten Biegewandler 10 in einer gemeinsamen Ebene e1 angeordnet ist, umfassen, wobei der zweite Biegewandler 10, 12 ein erstes und ein zweites Biegeelement 10, 12 umfassen kann, die in Serie geschaltet sind, um so den zweiten Biegewandler zu formen.
- 20 **[0177]** Gemäß einem einundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis vierzigsten Aspekts kann das erste Biegeelement ein eingespanntes Ende und ein freies Ende aufweisen und das zweite Biegeelement mit seinem eingespannten Ende an das freie Ende des ersten Biegeelements 10 angreifen und mit seinem freien Ende das freie Ende 10f, 12f des ersten und/oder zweiten Biegewandlers 10, 12 formen.
- 25 **[0178]** Gemäß einem zweiundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis einundvierzigsten Aspekts kann das erste Biegeelement über ein flexibles Element mit dem zweiten Biegeelement verbunden sein.
- 30 **[0179]** Gemäß einem dreiundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis zweiundvierzigsten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler einen Rahmen aufweisen.
- [0180]** Gemäß einem vierundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den dreiundvierzigsten Aspekt kann der Rahmen im Bereich des Übergangs zwischen dem ersten und dem zweiten Biegeelement angeordnet sein.
- 35 **[0181]** Gemäß einem fünfundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis vierundvierzigsten Aspekts können das erste Biegeelement und das zweite Biegeelement mit unterschiedlichen Steuersignalen angesteuert werden.
- [0182]** Gemäß einem sechsundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis fünfundvierzigsten Aspekts können der erste und/oder zweite Biegewandler 10, 12 ein flächiger, trapezförmiger oder rechteckiger Biegewandler sein.
- 40 **[0183]** Gemäß einem siebenundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis sechsundvierzigsten Aspekts können der erste und/oder zweite Biegewandler 12 ein dreieckiger oder kreissegmentförmiger Biegewandler sein.
- [0184]** Gemäß einem achtundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis siebenundvierzigsten Aspekts kann der mikromechanische Schallwandler 1, 1', 1" einen oder mehrere weitere Biegewandler umfassen, die in der gemeinsamen Fläche angeordnet sind, so dass deren freie Enden von den freien Enden 10f, 12f des ersten und/oder zweiten Biegewandlers 12 durch einen Spalt 14 getrennt sind, wobei der zumindest eine weitere Biegewandler 12 phasengleich zu der vertikalen Schwingung des ersten und/oder zweiten Biegewandlers 10, 12 zur vertikalen Schwingung angeregt werden kann.
- 45 **[0185]** Gemäß einem neunundvierzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis achtundvierzigsten Aspekts kann der Spalt 14 kleiner 10% oder kleiner 5% oder 1% oder 0,1%, oder kleiner 0,01% der Fläche des ersten Biegewandlers 10 sein.
- [0186]** Gemäß einem fünfzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des fünfunddreißigsten bis neunundvierzigsten Aspekts kann der Spalt 14 bei Auslenkung kleiner 15% oder kleiner 10%, 5%, 1% oder 0,1%, oder kleiner 0,01% der Fläche des ersten Biegewandlers 10 sein.
- 55 **[0187]** Gemäß einem einundfünfzigsten Aspekt kann ein Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Schallwandlers nach einem des fünfunddreißigsten bis fünfzigsten Aspekts, der einen ersten Biegewandler 10 umfasst, folgende Schritte aufweisen: Bereitstellen einer ersten Schicht in einer gemeinsamen Ebene e1, die zumindest den ersten Biegewandler 10 mit jeweils einem ersten und einem zweiten Biegeelement formt, sodass der erste Biegewandler 10

ein freies Ende 10f aufweist; und Verbinden des jeweils ersten Biegeelements mit dem zweiten Biegeelement des jeweiligen ersten Biegewandlers.

[0188] Gemäß einem zweiundfünfzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf einen des ersten bis dreiunddreißigsten oder fünfunddreißigsten bis neunundvierzigsten Aspekts können zwei Biegewandler 10 mit ihrem eingespannten Ende gegenüber einem Substrat 23s gelagert sein, wobei die Geometrie des ersten der zwei Biegewandler durch die Geometrie des zweiten der zwei Biegewandler 10 eingeschlossen oder umschlossen ist.

[0189] Gemäß einem dreiundfünfzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den zweiundfünfzigsten Aspekt kann der zweite der zwei Biegewandler 10 eine Aussparung für den ersten der zwei Biegewandler 10 aufweisen.

[0190] Gemäß einem vierundfünfzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den zweiundfünfzigsten oder dreiundfünfzigsten Aspekt können die zwei Biegewandler durch einen Schlitz oder einen Schlitz mit Blende separiert sein.

[0191] Gemäß einem fünfundfünfzigsten Aspekt unter Bezugnahme auf den zweiundfünfzigsten, dreiundfünfzigsten oder vierundfünfzigsten Aspekt können die zwei Biegewandler mit zwei unterschiedlichen Steuersignalen oder mit zwei Steuersignalen für zwei unterschiedliche Frequenzbereiche ansteuerbar sein.

15 Quellenangaben

[0192]

[Hou13] Houdouin et al., Acoustic vs electric power response of a high-performance MEMS microspeaker, IEEE SENSORS 2014

[Dej12] Dejaeger et al., Development and Characterization of a Piezoelectrically Actuated MEMS Digital Loudspeaker, Procedia Engineering 47 (2012) 184 - 187

[Gla13] Glacer et al., Reversible acoustical transducers in MEMS technology, Proc. DTIP 2013,

[Yi09] Yi et al., Performance of packaged piezoelectric microspeakers depending on the material properties, Proc. MEMS 2009, 765-768

Patentansprüche

1. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') mit einem ersten Biegewandler (10), der ein freies Ende (10f) oder eine freie Seite hat und ausgebildet ist, zur vertikalen Schwingung angeregt zu werden, um einen Schall zu emittieren oder aufzunehmen;

wobei der erste Biegewandler (10, 12) ein erstes und ein zweites Biegeelement umfasst, die in Serie geschaltet sind, um so den ersten Biegewandler zu formen, wobei das erste Biegeelement mit jeweils einem ersten Steuersignal und das zweite Biegeelement mit einem zweiten Steuersignal ansteuerbar sind;

wobei das erste Biegeelement ein eingespanntes Ende und ein freies Ende aufweist und das zweite Biegeelement mit seinem eingespannten Ende an das freie Ende des ersten Biegeelements (10) angreift und mit seinem freien Ende das freie Ende (10f, 12f) des ersten Biegewandlers (10, 12) formt und wobei das erste Biegeelement über ein flexibles Element oder ein Verbindungselemente (17) mit dem zweiten Biegeelement verbunden ist.

2. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß Anspruch 1, bei dem sich das erste Steuersignal von dem zweiten Steuersignal unterscheidet.

3. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß Anspruch 2, wobei das erste Steuersignal und das zweite Steuersignal von einem gemeinsamen Ursprungssignal abgeleitet sind und das erste Steuersignal gegenüber dem zweiten Steuersignal modifiziert ist.

4. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß Anspruch 1 oder 3, wobei das erste Steuersignal einen von dem zweiten Steuersignal unterschiedlichen oder teilweise überlappenden Frequenzbereich aufweist oder wobei das erste Steuersignal und das zweite Steuersignal von einem gemeinsamen Ursprungssignal abgeleitet sind und das erste Steuersignal eine andere Frequenzfilterung erfahren hat als das zweite Steuersignal.

5. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß Anspruch 4, wobei das erste Steuersignal einen niedrigeren Frequenzbereich hat als das zweite Steuersignal.

- 5
6. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, der einen zweiten Biegewandler (12), der ein freies Ende (12f) hat und mit dem ersten Biegewandler (10) in einer gemeinsamen Ebene (e1) angeordnet ist, umfasst, wobei der zweite Biegewandler (10, 12) ein erstes und ein zweites Biegeelement (10, 12) umfasst, die in Serie geschaltet sind, um so den zweiten Biegewandler zu formen.
- 10
7. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei der mikromechanische Schallwandler einen Rahmen aufweist; oder wobei der mikromechanische Schallwandler einen Rahmen aufweist und wobei der Rahmen im Bereich des Übergangs zwischen dem ersten und dem zweiten Biegeelement angeordnet ist.
- 15
8. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei das erste Biegeelement und das zweite Biegeelement mit unterschiedlichen Steuersignalen angesteuert werden.
- 20
9. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei der erste Biegewandler (10, 12) ein flächiger, trapezförmiger oder rechteckiger Biegewandler ist; oder wobei der erste Biegewandler (12) ein dreieckiger oder kreissegmentförmiger Biegewandler ist.
- 25
10. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei dieser ein oder mehrere weitere Biegewandler umfasst, die in der gemeinsamen Fläche angeordnet sind, so dass deren freie Enden von den freien Enden (10f, 12f) des ersten Biegewandlers (12) durch einen Spalt (14) getrennt sind, wobei der zumindest eine weitere Biegewandler (12) phasengleich zu der vertikalen Schwingung des ersten Biegewandlers (10, 12) zur vertikalen Schwingung angeregt wird.
- 30
11. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß Anspruch 10, wobei der Spalt (14) kleiner 10% oder kleiner 5% oder 1% oder 0,1%, oder kleiner 0,01 % der Fläche des ersten Biegewandlers (10) ist; und/oder wobei der Spalt (14) bei Auslenkung kleiner 15% oder kleiner 10%, 5%, 1% oder 0,1%, oder kleiner 0,01% der Fläche des ersten Biegewandlers (10) ist.
- 35
12. Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Schallwandlers nach einem der Ansprüche 1 bis 11, der einen ersten Biegewandler (10) umfasst, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:
- Bereitstellen einer ersten Schicht in einer gemeinsamen Ebene (e1), die zumindest den ersten Biegewandler (10) mit jeweils einem ersten und einem zweiten Biegeelement formt, sodass der erste Biegewandler (10) ein freies Ende (10f) aufweist; und
- Verbinden des jeweils ersten Biegeelements mit dem zweiten Biegeelement des jeweiligen ersten Biegewandlers.
- 40
13. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei der erste und ein zweiter Biegewandler (10) mit ihrem eingespannten Ende gegenüber einem Substrat (23s) gelagert sind, wobei die Geometrie des ersten Biegewandlers durch die Geometrie des zweiten Biegewandlers (10) eingeschlossen oder umschlossen ist.
- 45
14. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß Anspruch 13, wobei der zweite der zwei Biegewandler (10) eine Aussparung für den ersten der zwei Biegewandler (10) aufweist; und/oder wobei die zwei Biegewandler durch einen Schlitz oder einen Schlitz mit Blende separiert sind.
- 50
15. Mikromechanischer Schallwandler (1, 1', 1'') gemäß Anspruch 13 oder 14, wobei die zwei Biegewandler mit zwei unterschiedlichen Steuersignalen oder mit zwei Steuersignalen für zwei unterschiedliche Frequenzbereiche ansteuerbar sind.

1

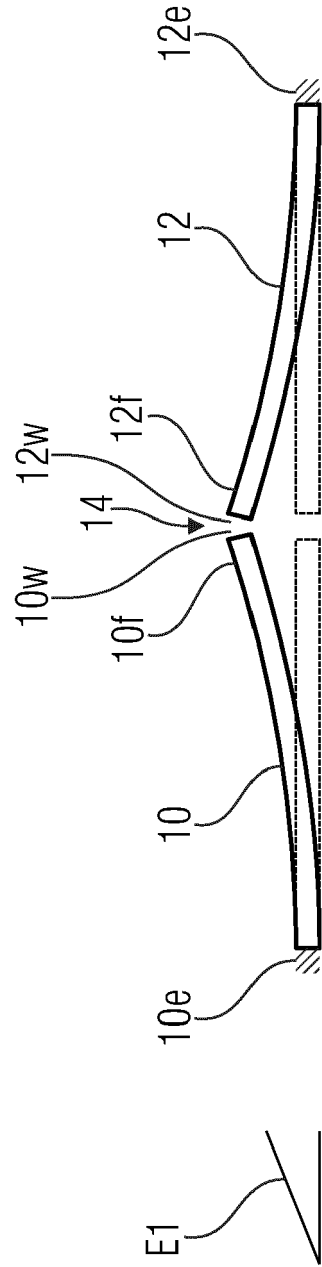


Fig. 1a

1'

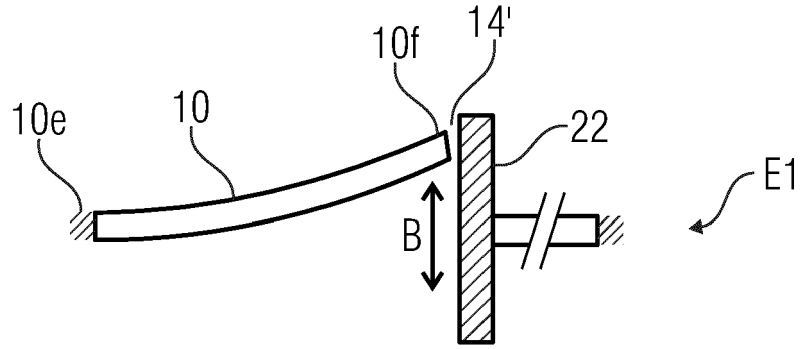


Fig. 1b

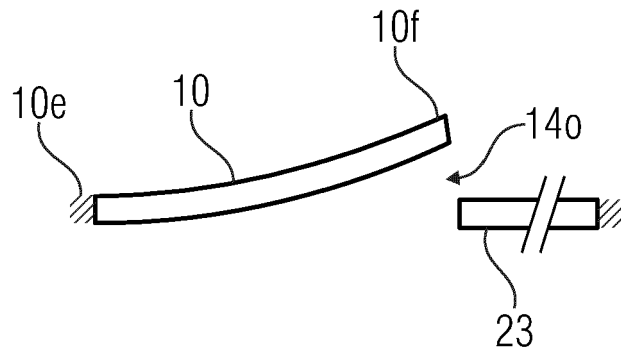


Fig. 1c

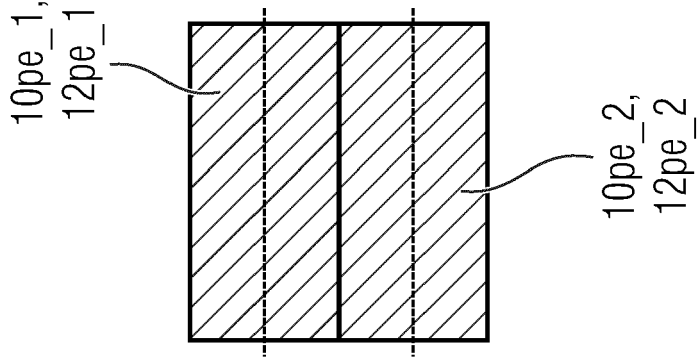


Fig. 2a

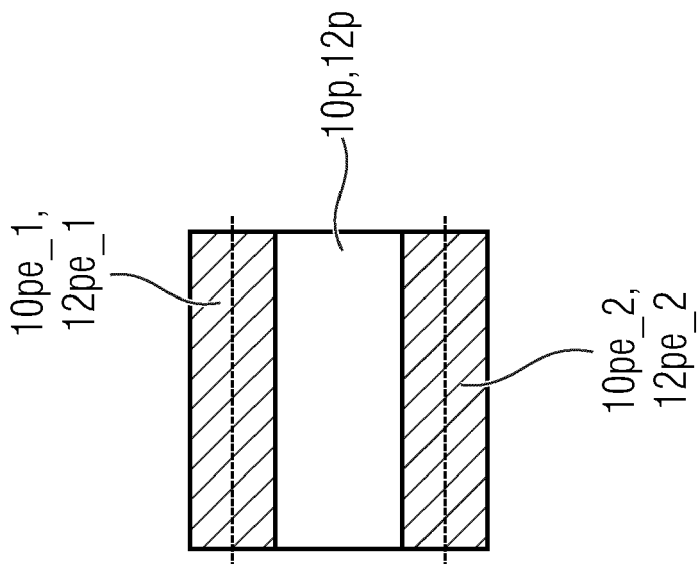


Fig. 2b

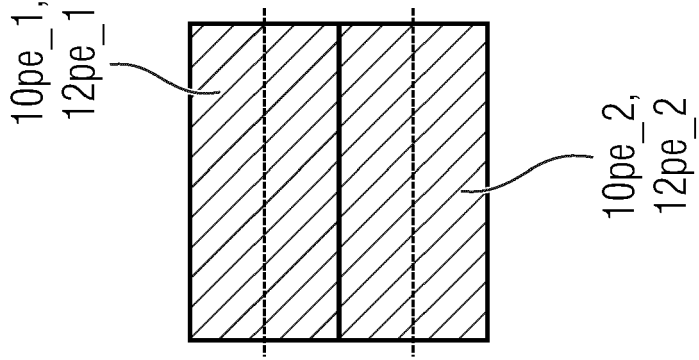


Fig. 2c

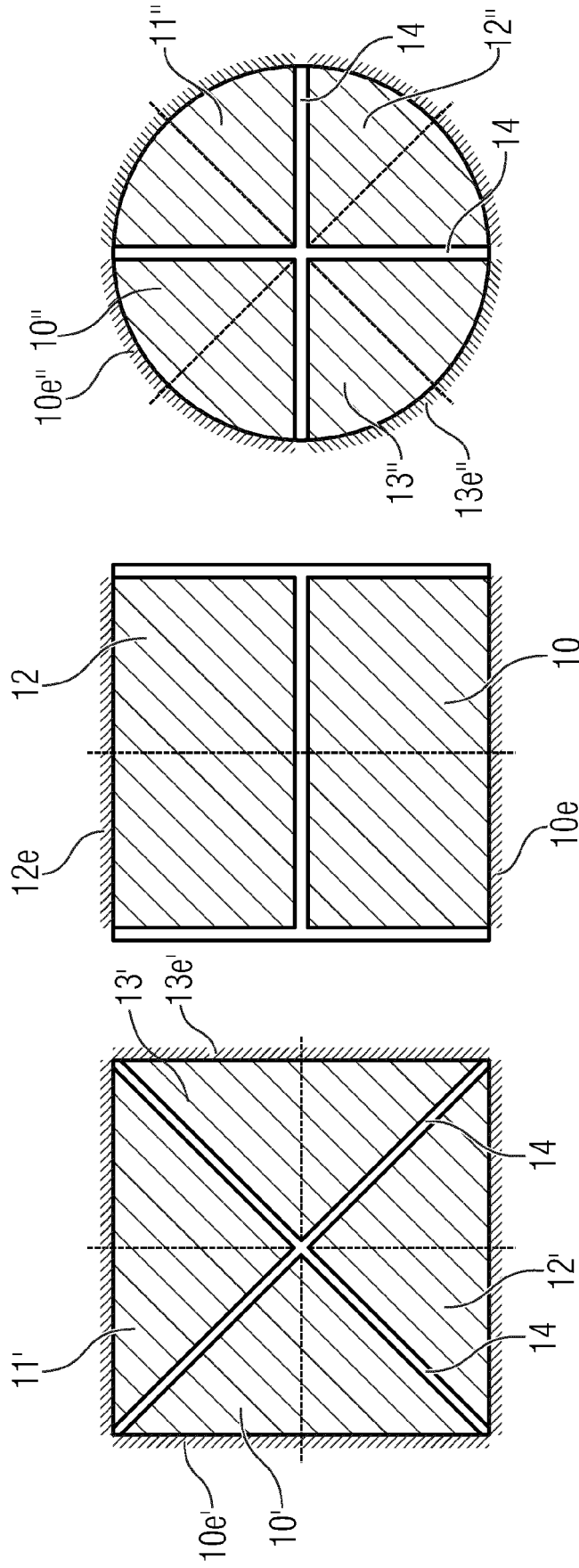


Fig. 3a

Fig. 3b

Fig. 3c

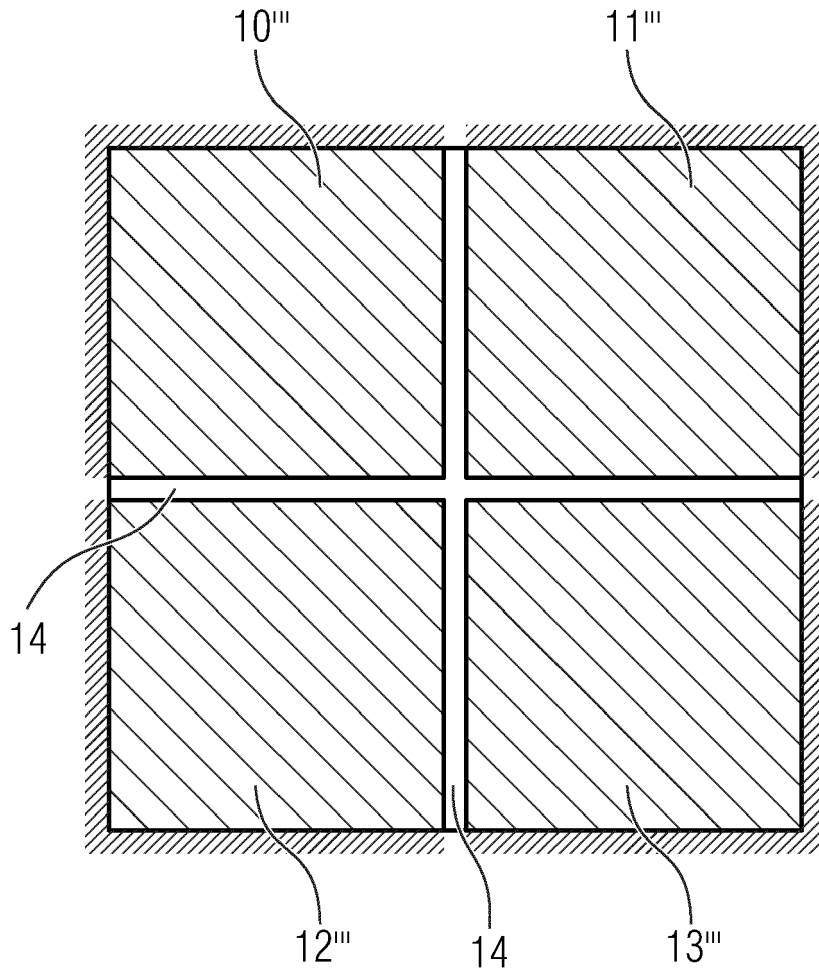


Fig. 3d

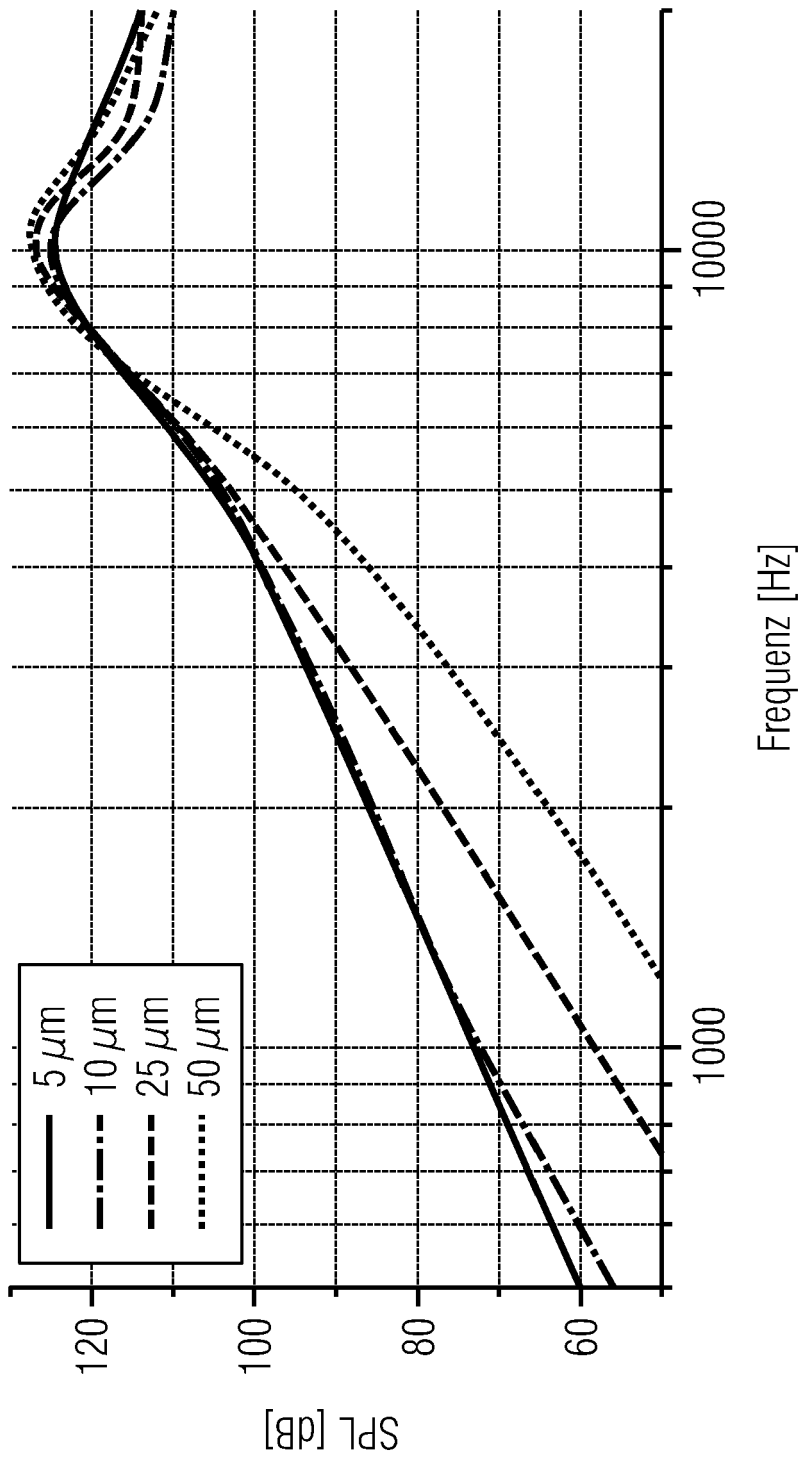


Fig. 4

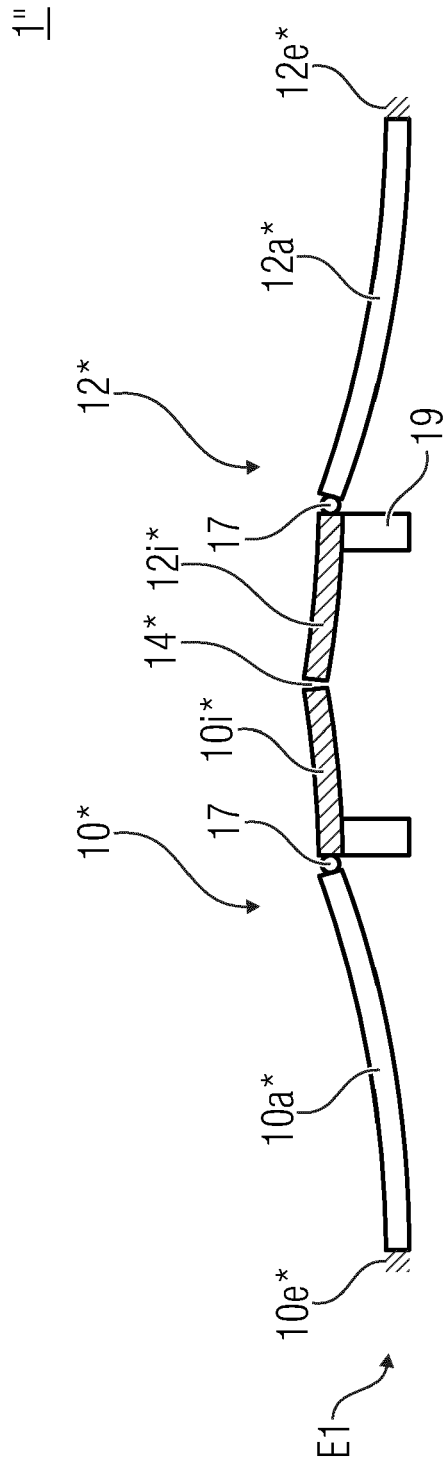


Fig. 5

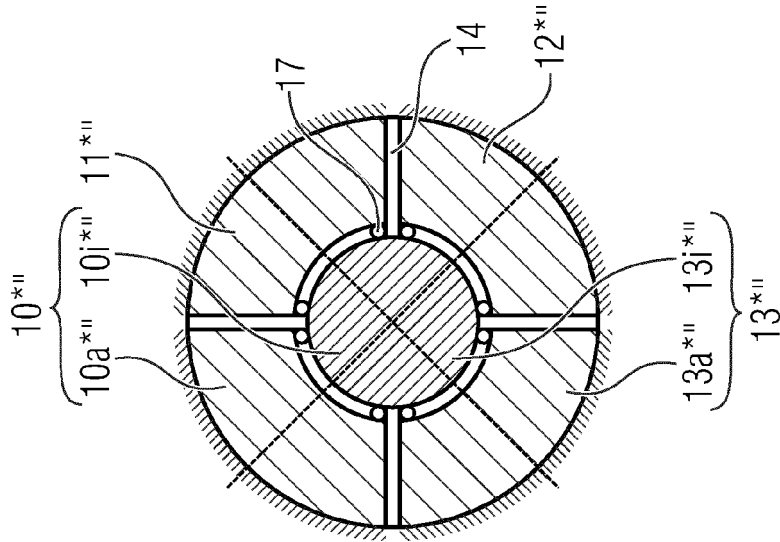


Fig. 6a

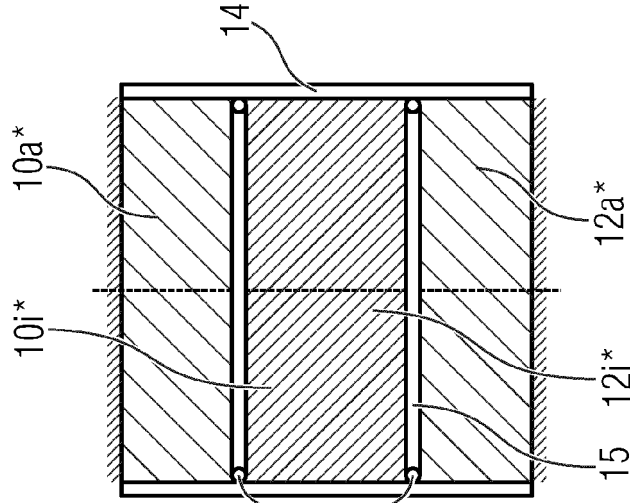


Fig. 6b

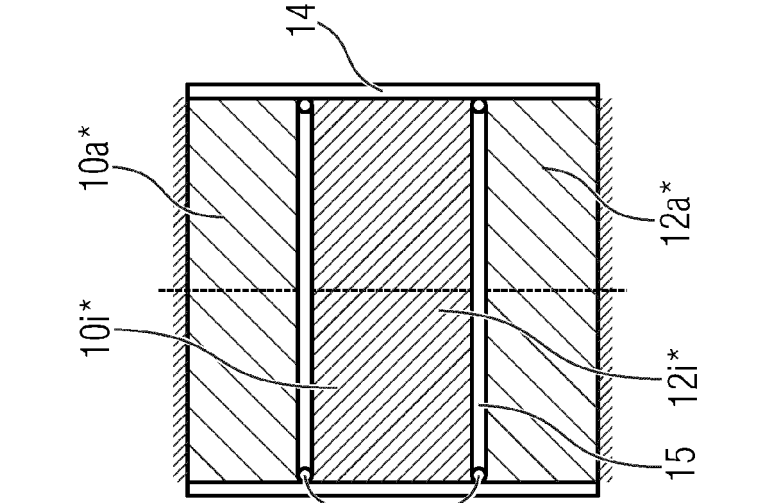


Fig. 6c

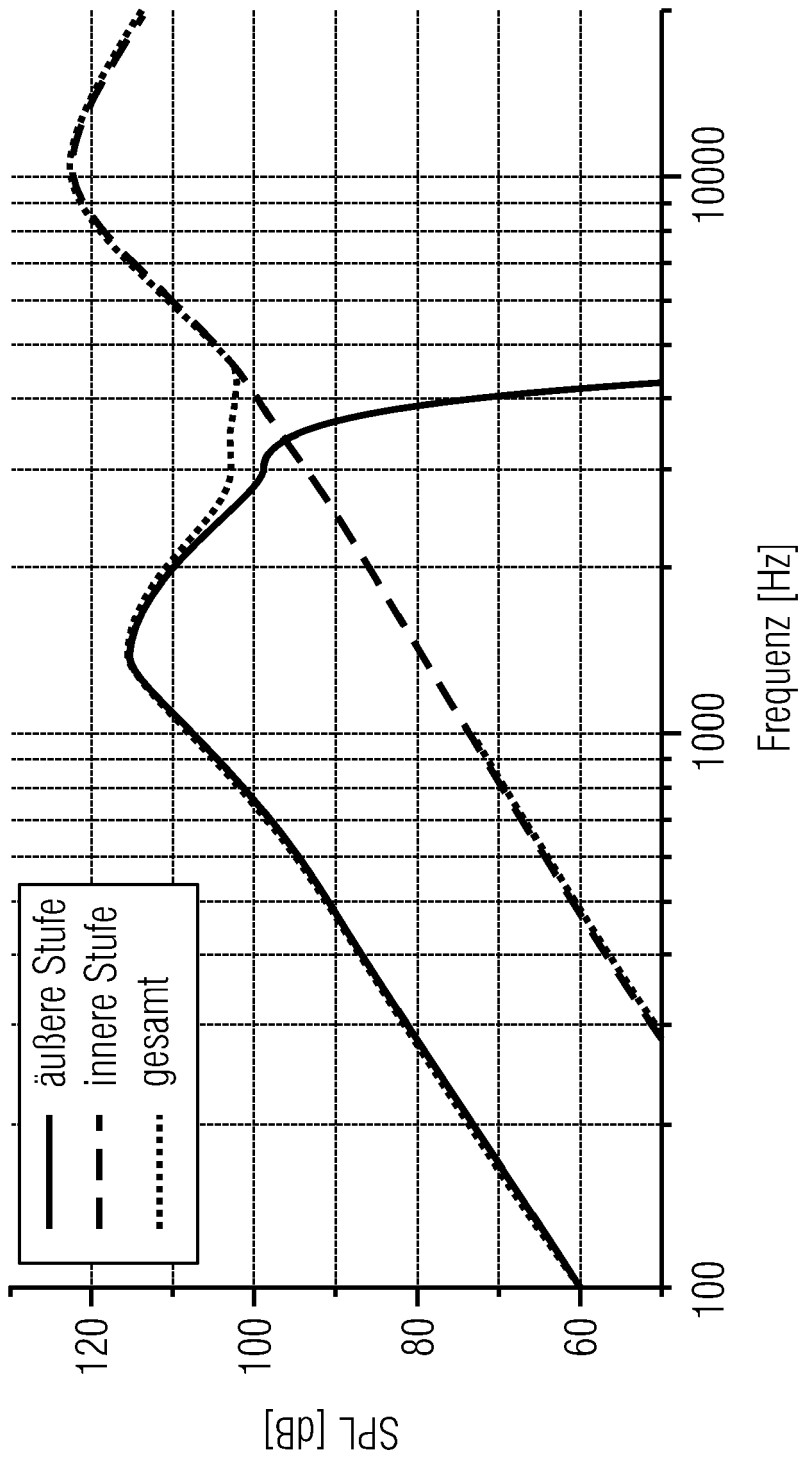


Fig. 7

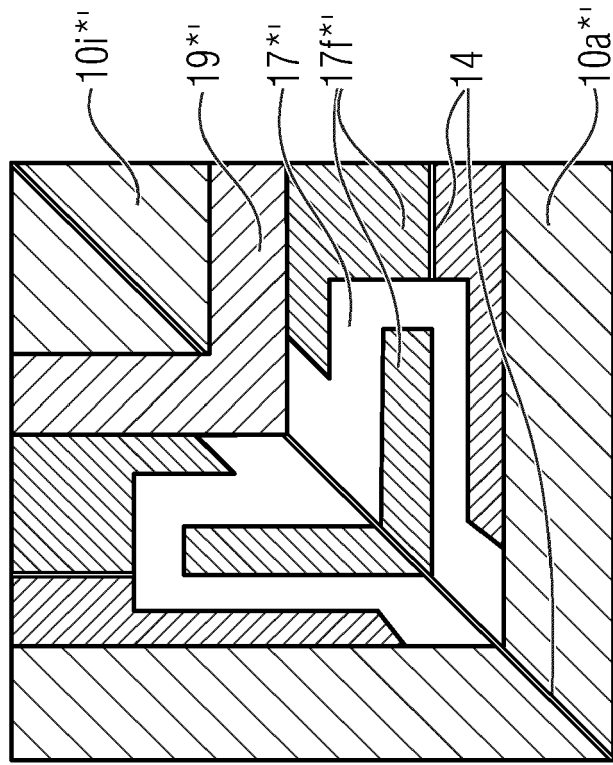


Fig. 8b

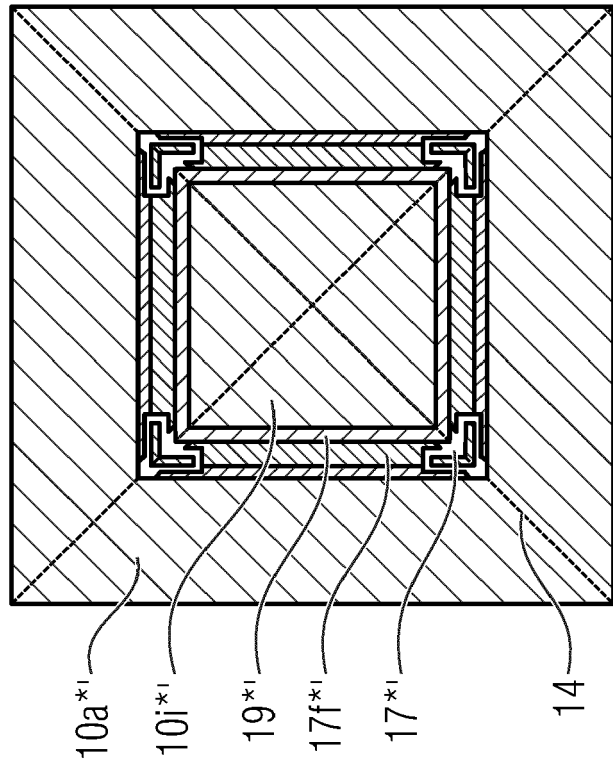


Fig. 8a

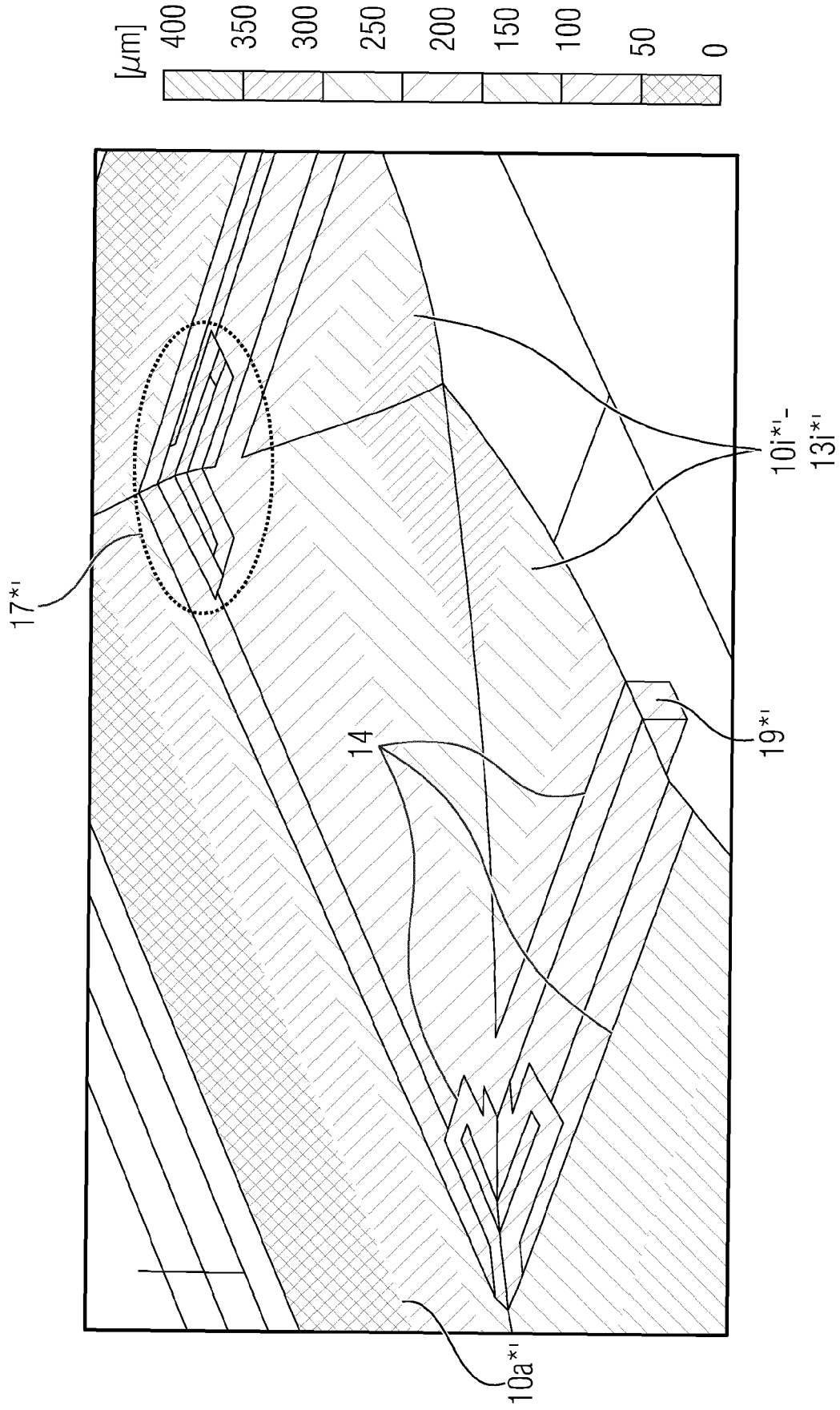


Fig 9

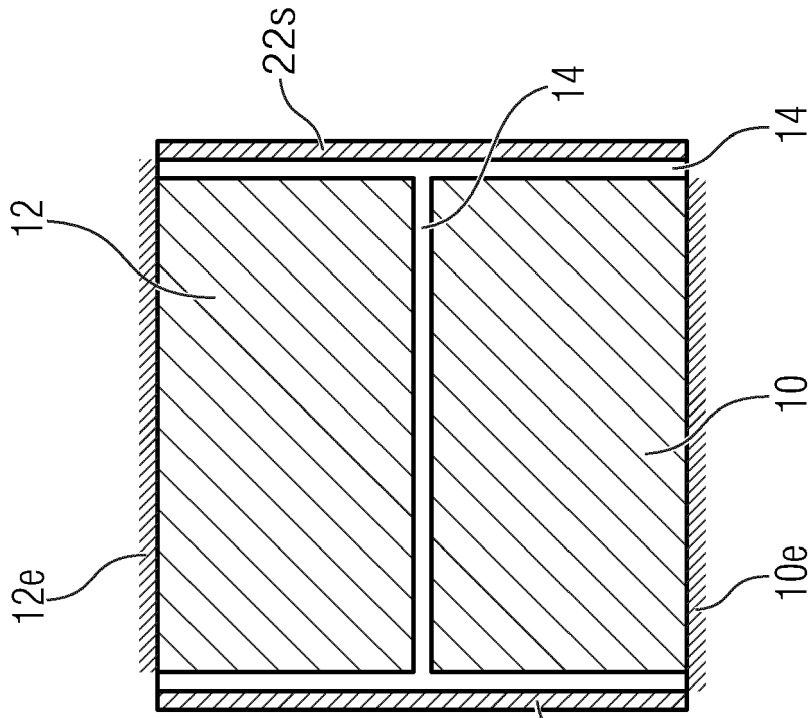


Fig. 10b

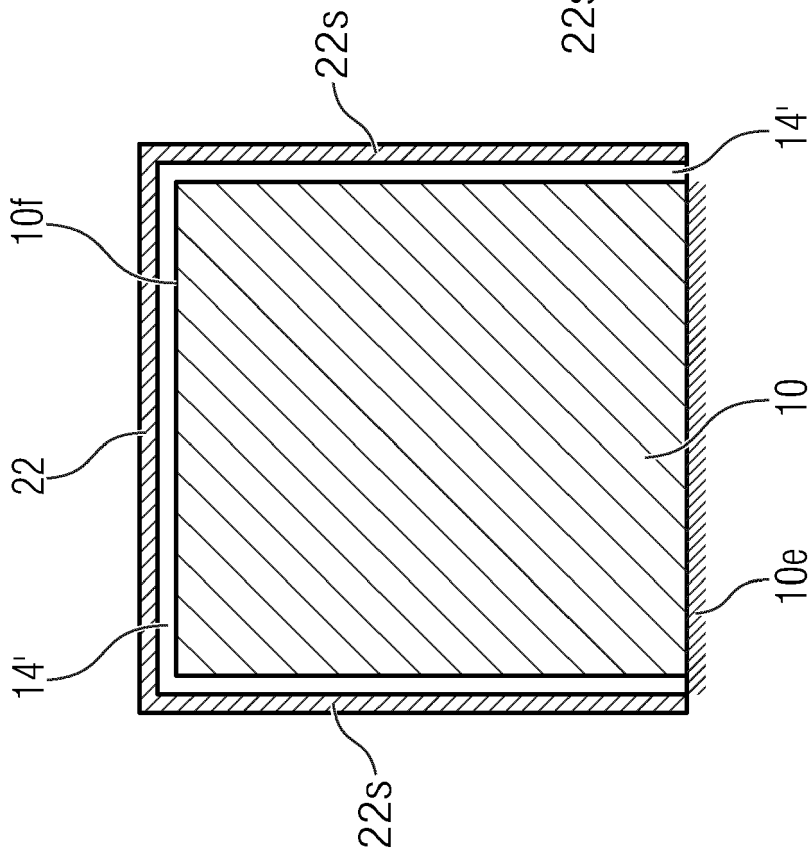


Fig. 10a

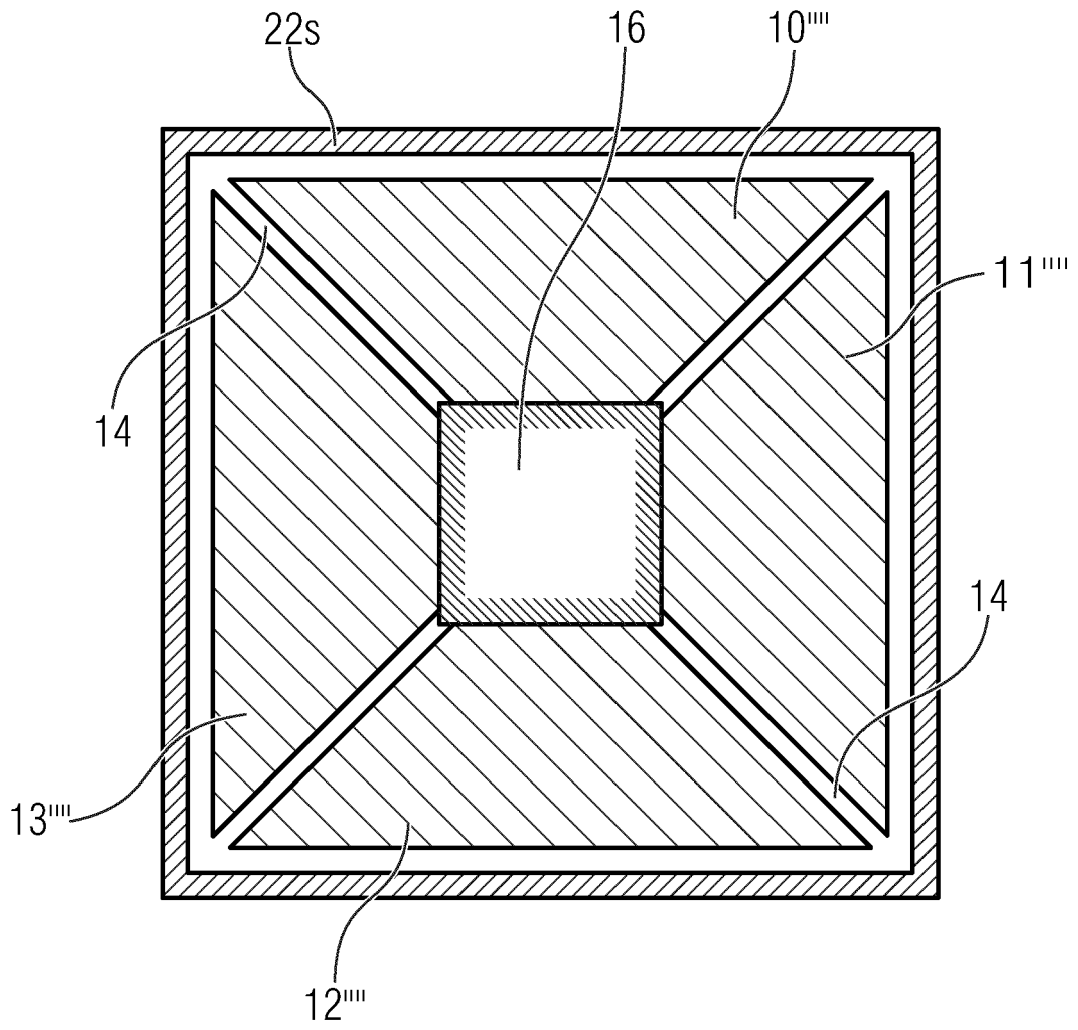


Fig. 10c

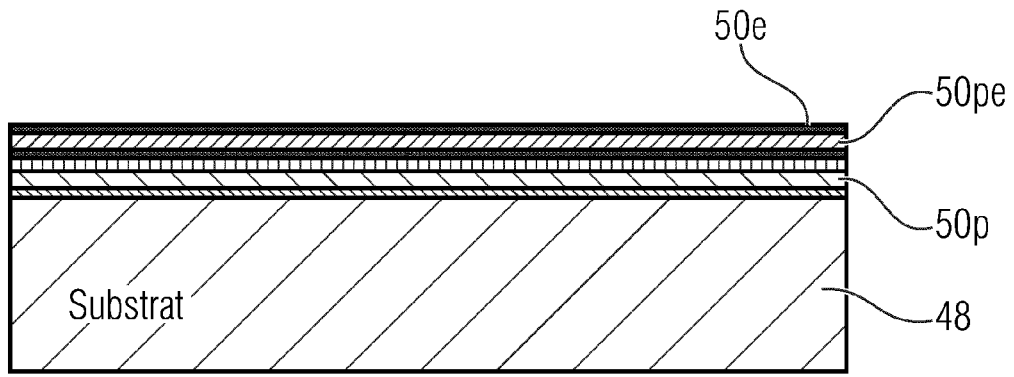


Fig. 11a

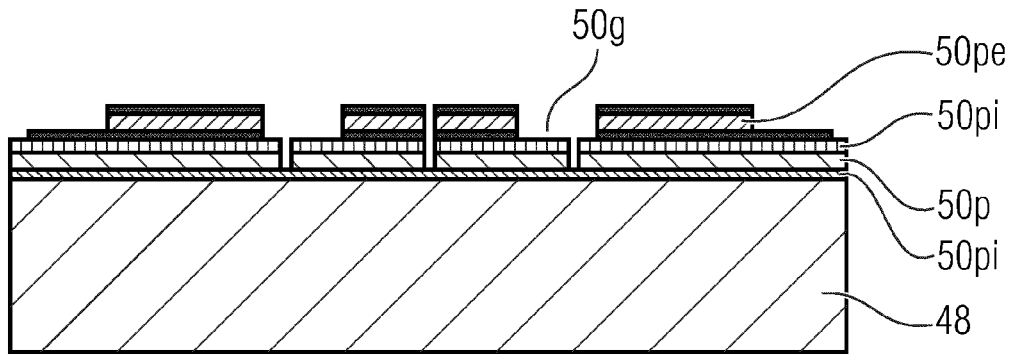


Fig. 11b

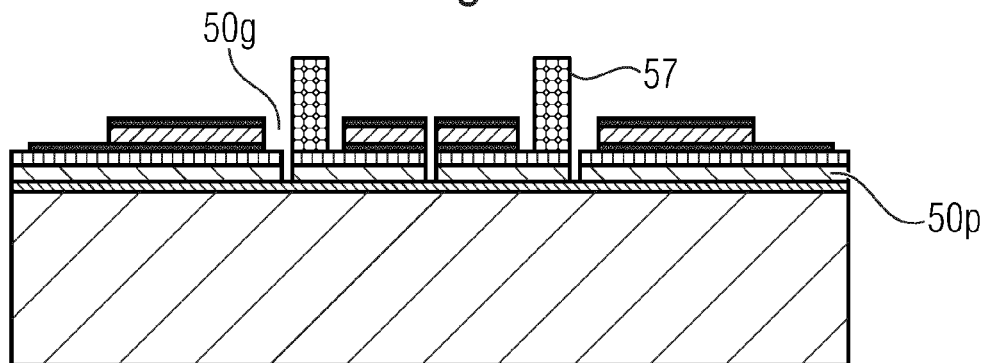


Fig. 11c

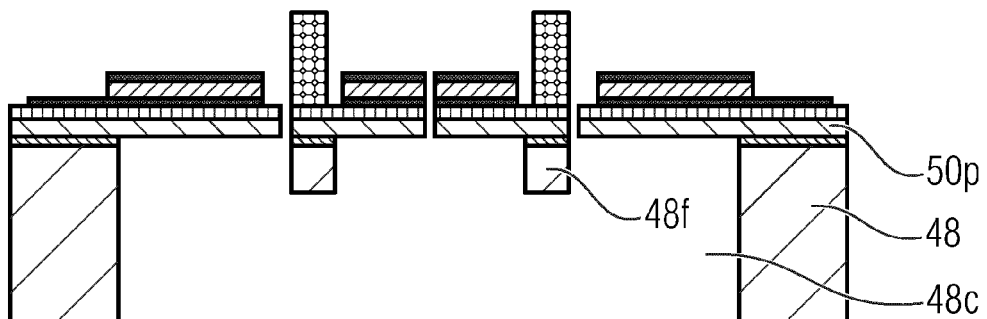


Fig. 11d

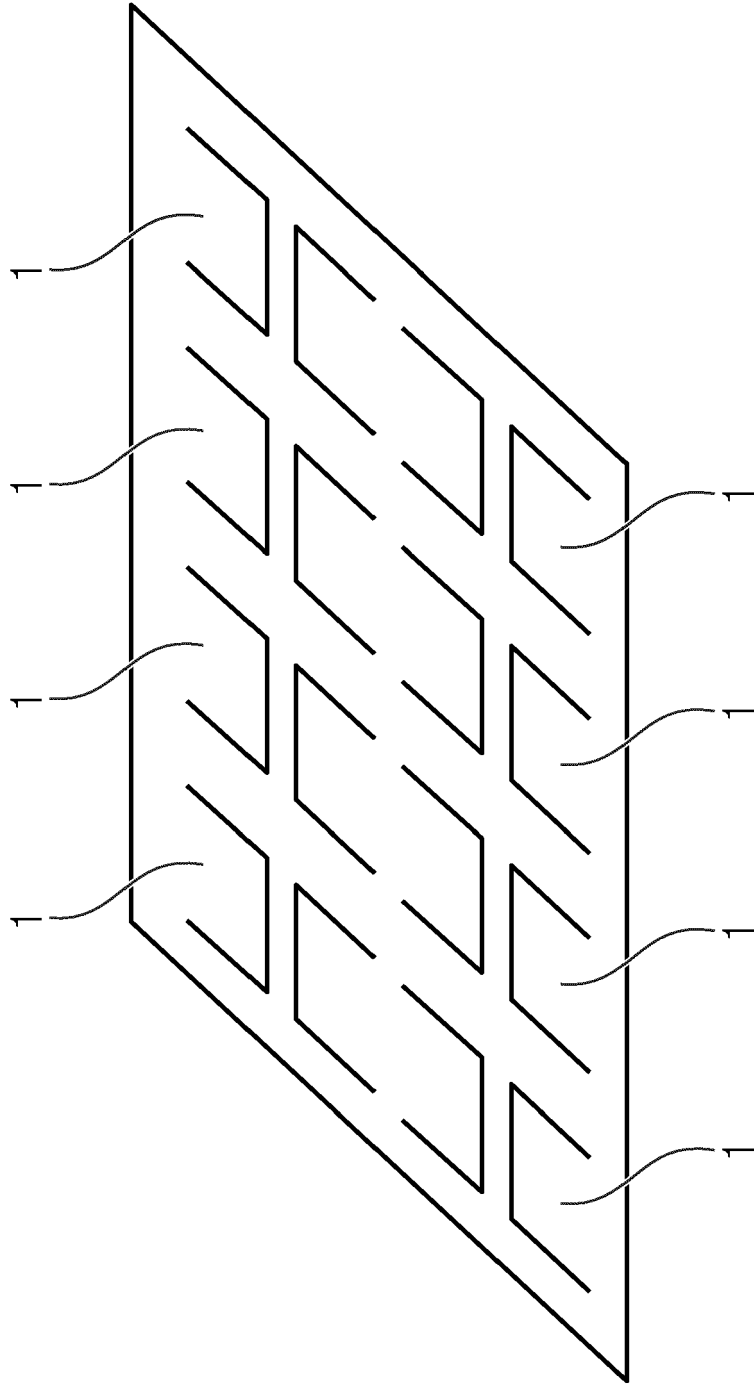


Fig. 12

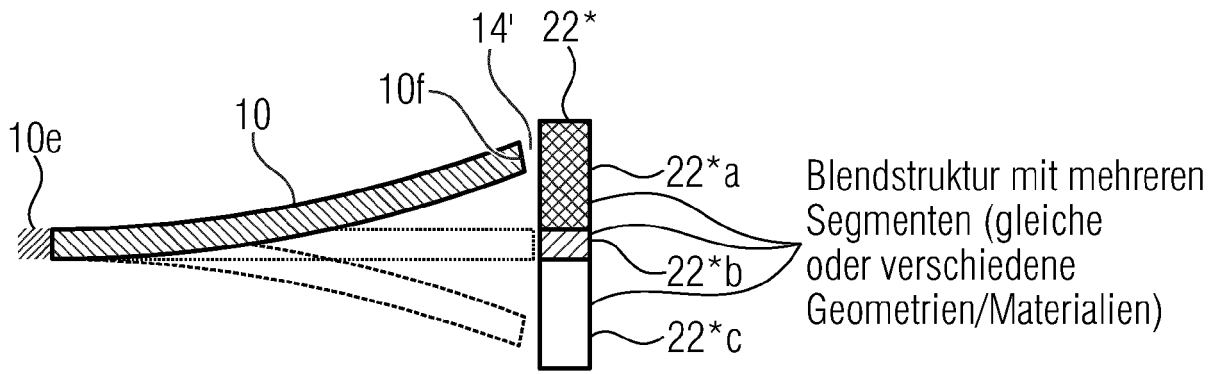


Fig. 13a

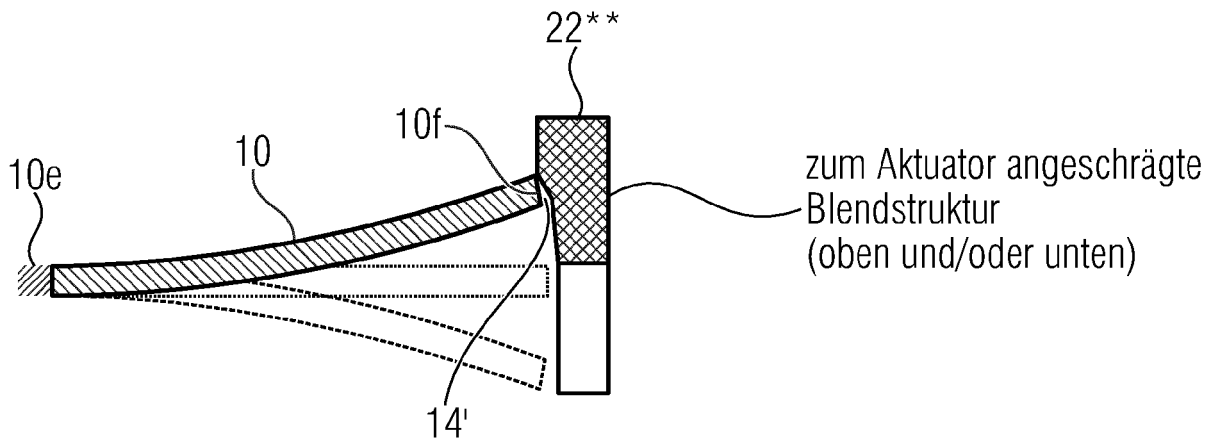


Fig. 13b

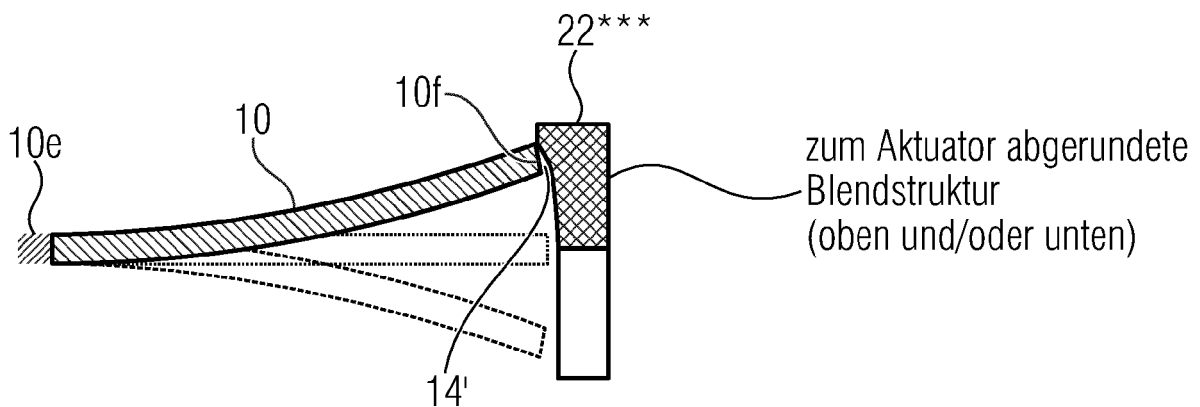


Fig. 13c

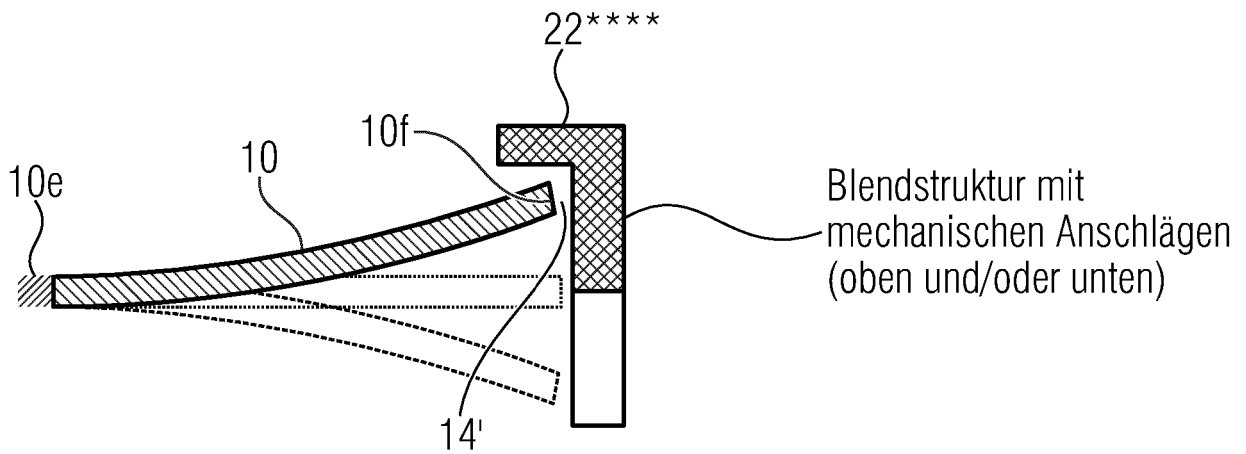


Fig. 13d

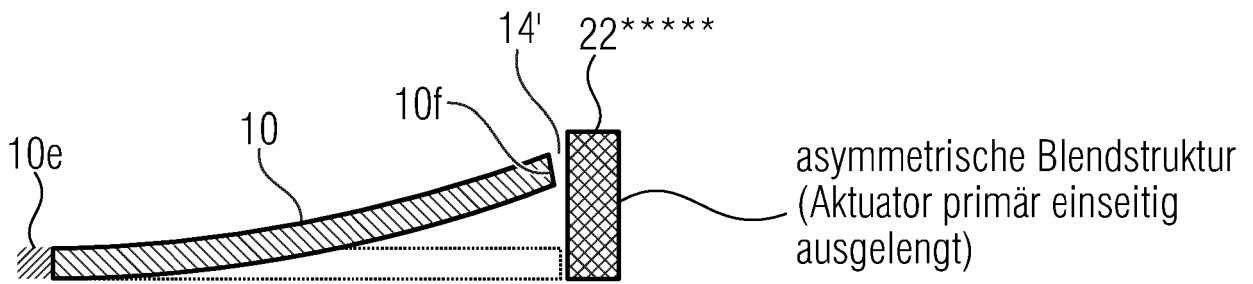


Fig. 13e

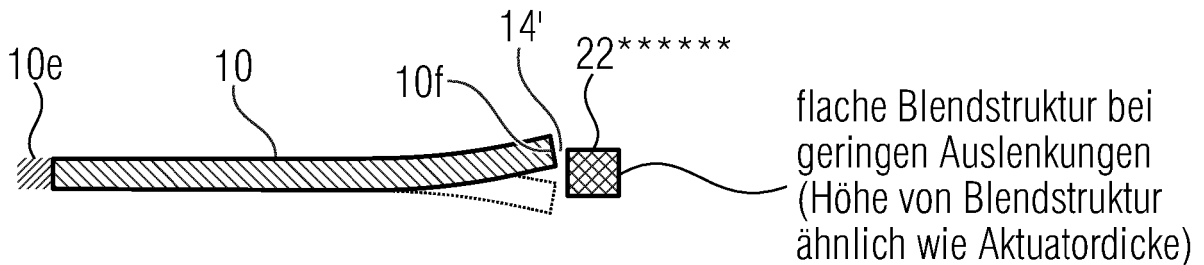


Fig. 13f

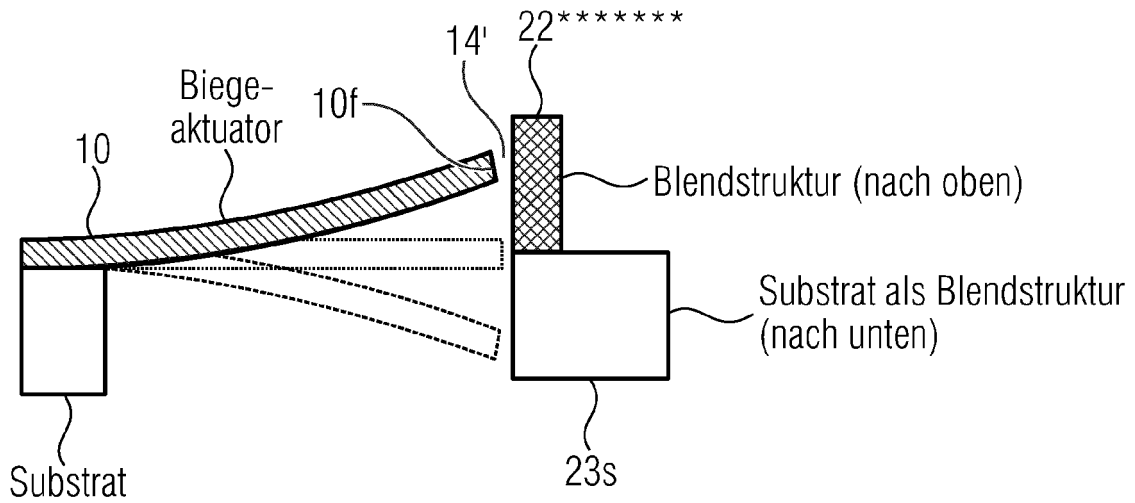


Fig. 13g

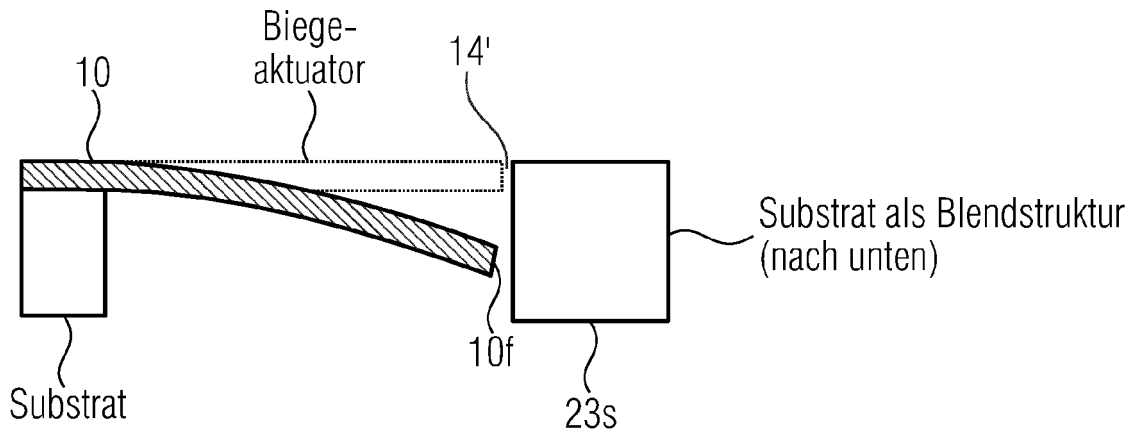


Fig. 13h

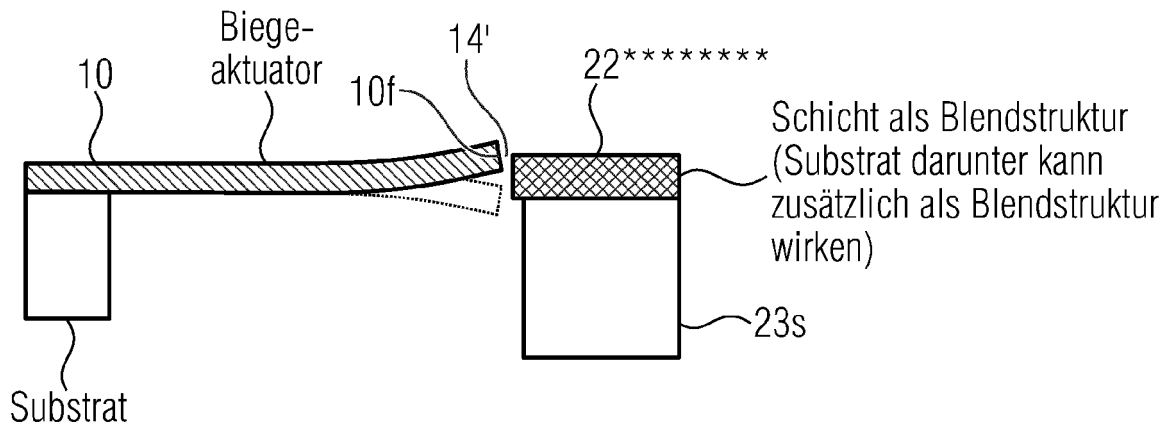


Fig. 13i

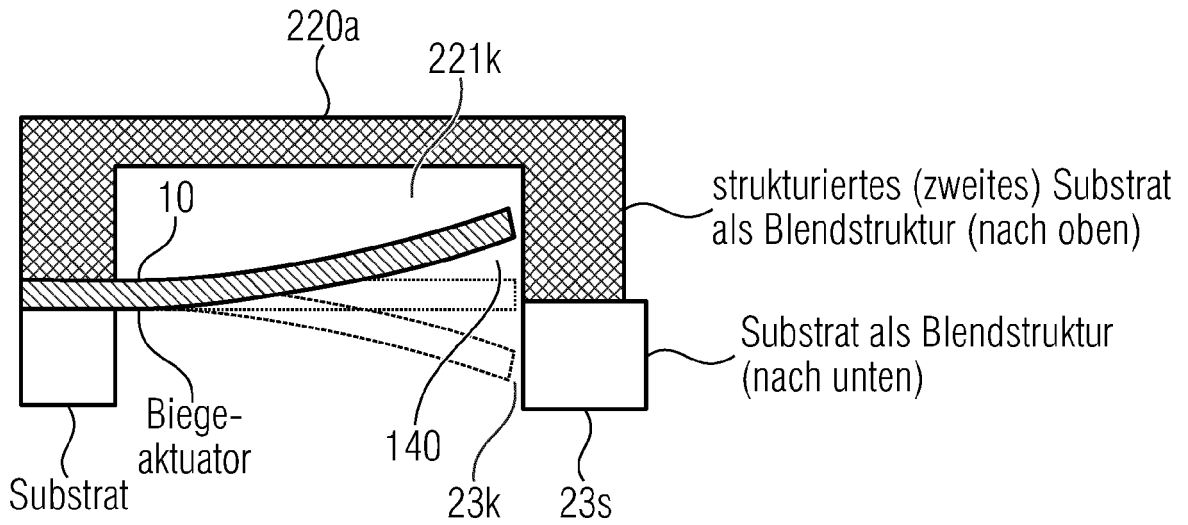


Fig. 14a

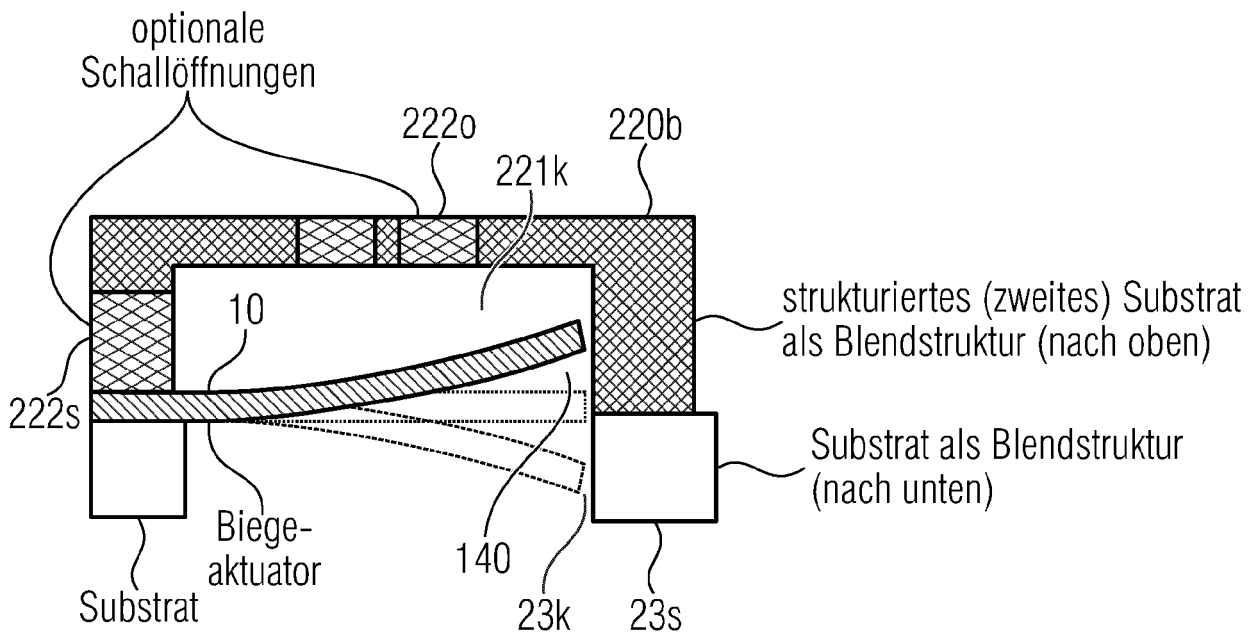


Fig. 14b

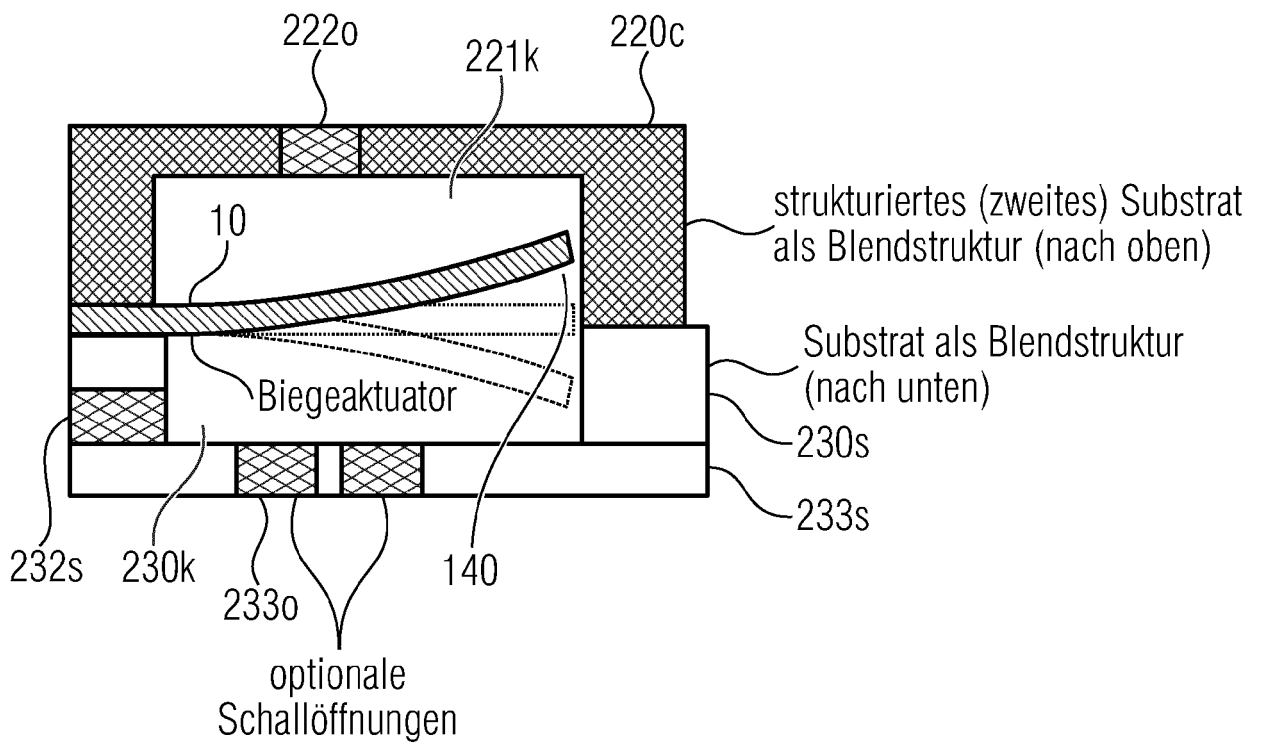


Fig. 14c

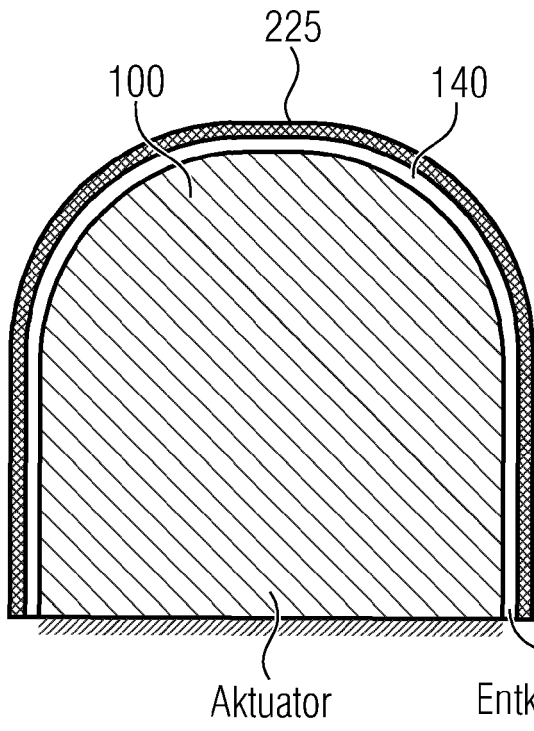


Fig. 15a

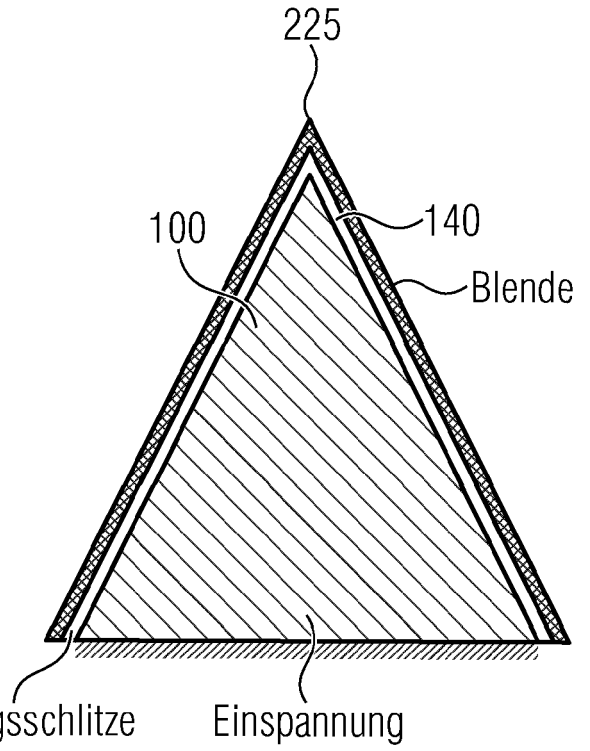


Fig. 15b

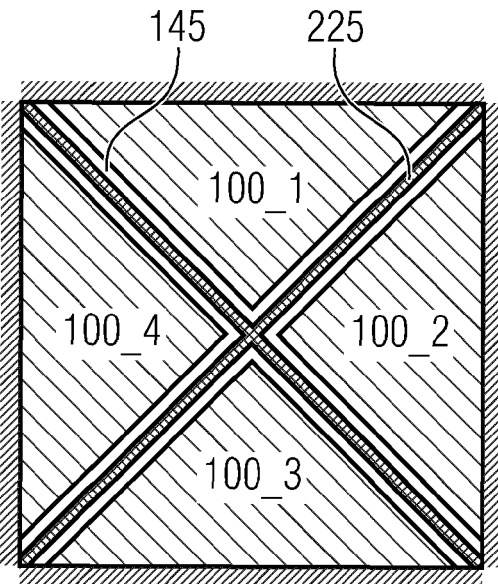


Fig. 15c

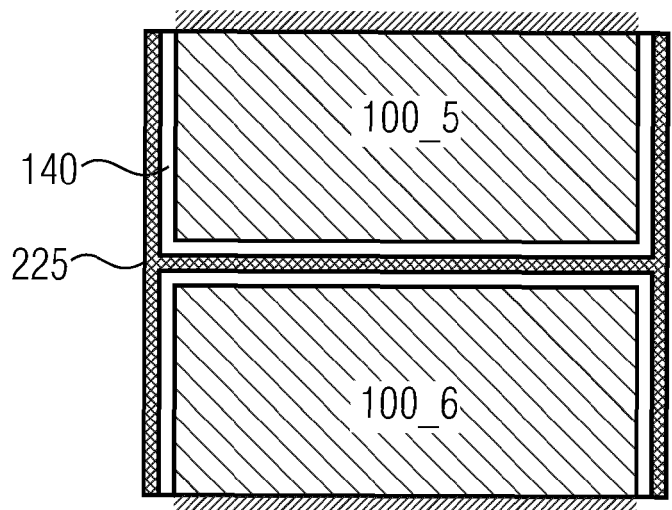


Fig. 15d

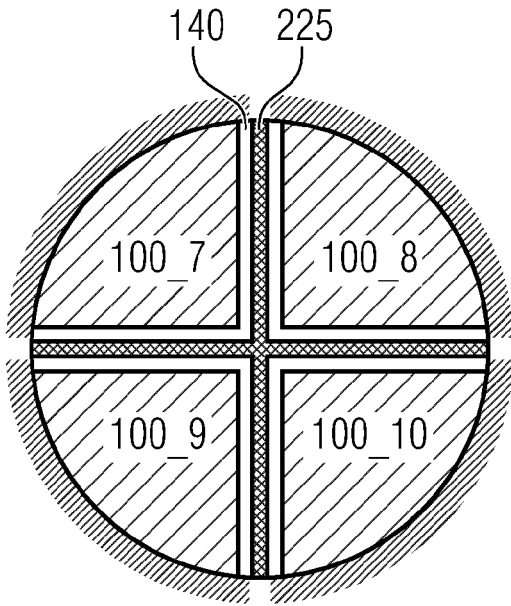


Fig. 15e

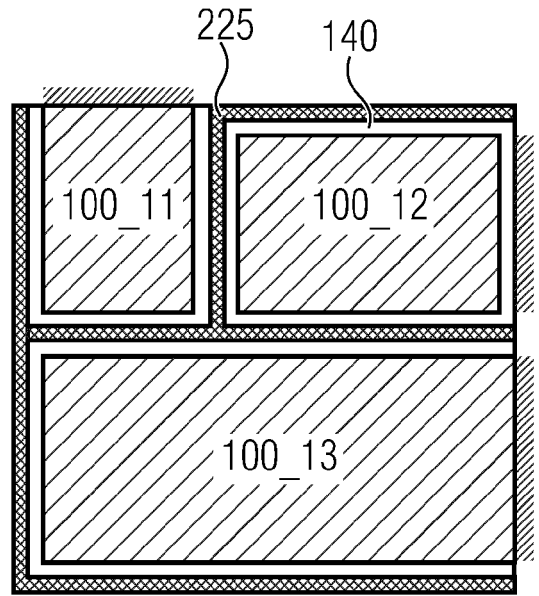


Fig. 15f

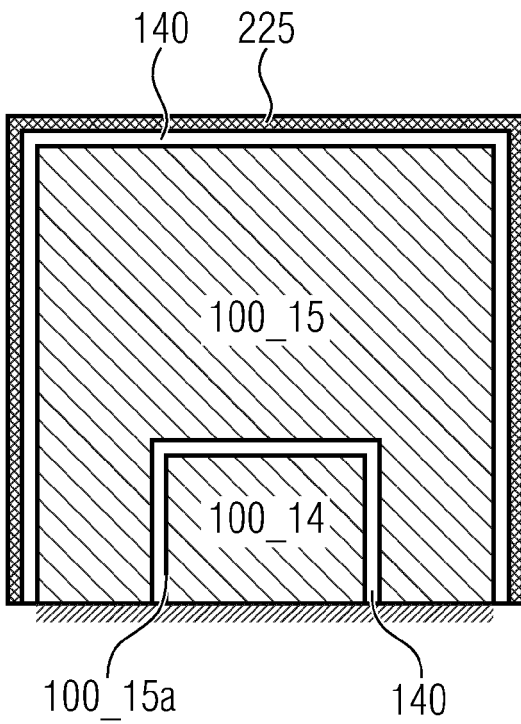


Fig. 15g

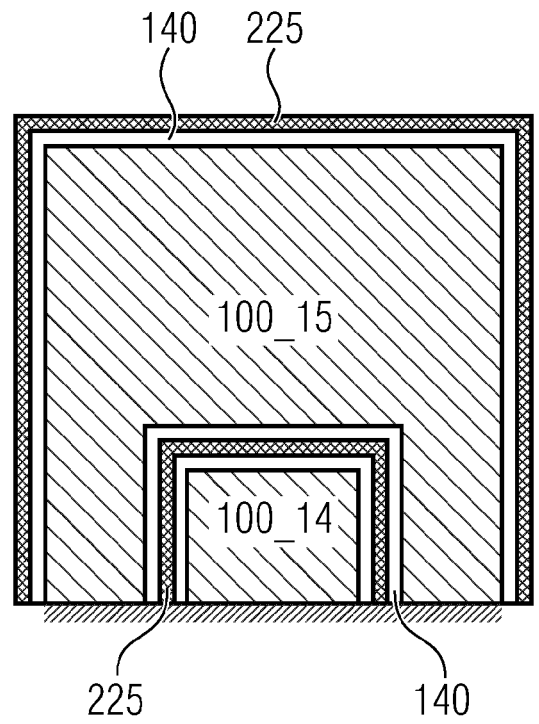


Fig. 15h

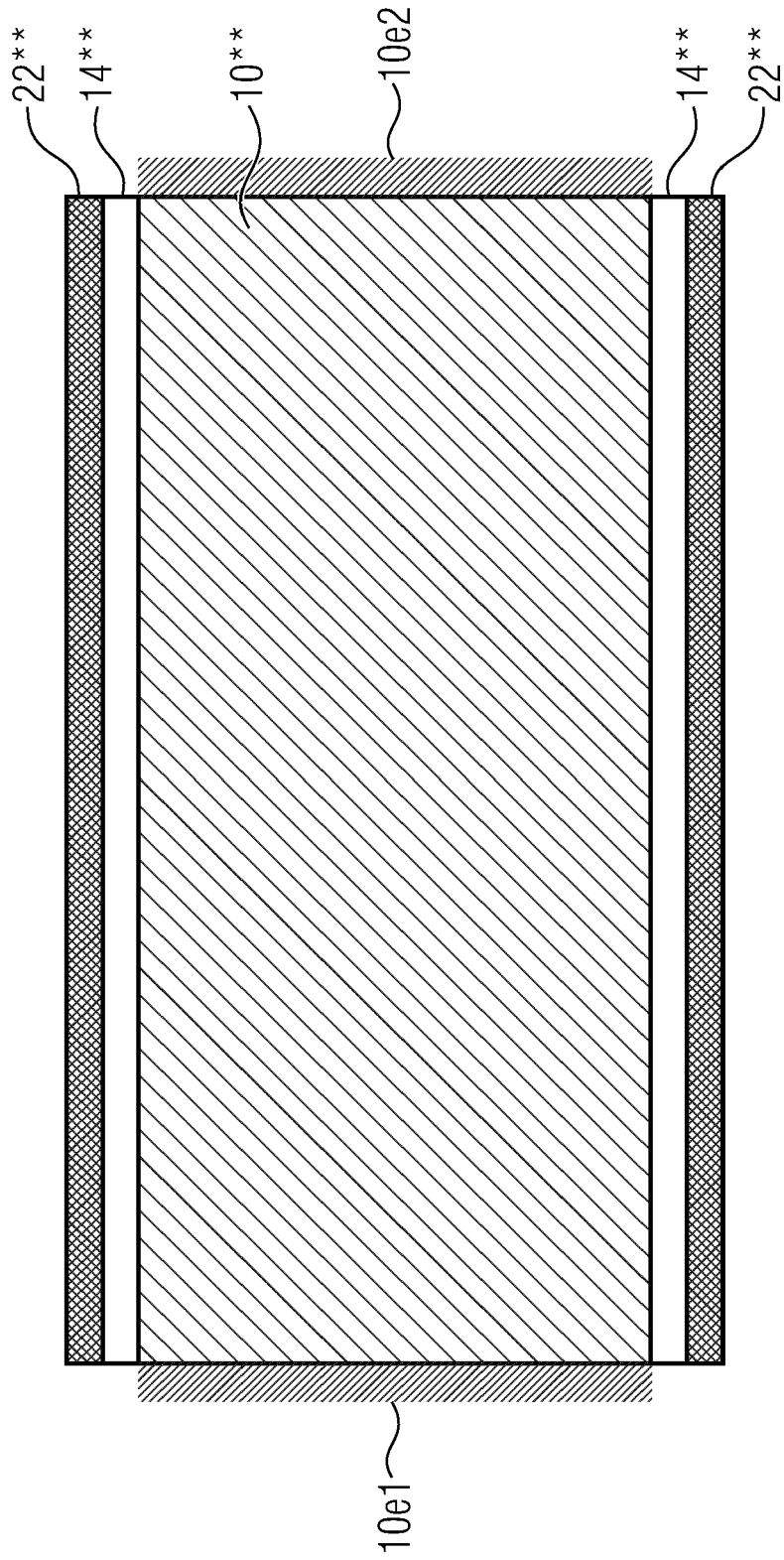


Fig. 16

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 2013156253 A1 [0004]
- US 7003125 B [0004]
- US 8280079 B [0004]
- US 20130294636 A1 [0004]
- US 20110051985 A1 [0004]
- US 7089069 B [0004]
- US 20100316242 A1 [0004]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **HOUDOUIN et al.** Acoustic vs electric power response of a high-performance MEMS microspeaker. *IEEE SENSORS*, 2014 [0192]
- **DEJAEGER et al.** Development and Characterization of a Piezoelectrically Actuated MEMS Digital Loudspeaker. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 47, 184-187 [0192]
- **GLACER et al.** Reversible acoustical transducers in MEMS technology. *Proc. DTIP*, 2013 [0192]
- **YI et al.** Performance of packaged piezoelectric microspeakers depending on the material properties. *Proc. MEMS*, 2009, 765-768 [0192]