



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 217 798.7**

(22) Anmeldetag: **05.09.2014**

(43) Offenlegungstag: **10.03.2016**

(51) Int Cl.: **H02N 2/02 (2006.01)**

**B81B 7/02 (2006.01)**

**B81B 3/00 (2006.01)**

**H01L 41/09 (2006.01)**

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

(74) Vertreter:  
**Schoppe, Zimmermann, Stöckeler, Zinkler,  
Schenk & Partner mbB Patentanwälte, 81373  
München, DE**

(72) Erfinder:  
**Stoppel, Fabian, 25524 Itzehoe, DE; Wagner,  
Bernhard, Prof. Dr., 25582 Looft, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

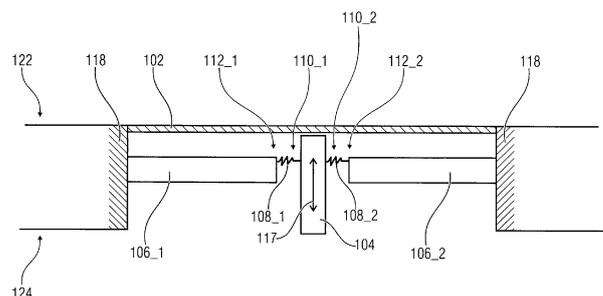
DE	699 38 602	T2
US	8 282 087	B2
US	2004 / 0 252 936	A1
US	2006 / 0 002 652	A1
EP	2 803 633	A1
JP	2006- 351 297	A

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Mikromechanische piezoelektrische Aktuatoren zur Realisierung hoher Kräfte und Auslenkungen**

(57) Zusammenfassung: Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung schaffen ein MEMS mit einer Membran, einer Hubstruktur, die mit der Membran gekoppelt ist, und zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren, die über eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen mit einer Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten der Hubstruktur verbunden sind, wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren ausgebildet sind, um eine Hubbewegung der Hubstruktur hervorzurufen, um die Membran auszulenken.



## Beschreibung

**[0001]** Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung beziehen sich auf ein MEMS (microelektromechanical system, dt Mikrosystem). Manche Ausführungsbeispiele beziehen sich auf mikromechanische piezoelektrische Aktuatoren zur Realisierung hoher Kräfte und Auslenkungen.

**[0002]** In den vergangenen Jahren haben miniaturisierte Aktuatoren stetig an Bedeutung gewonnen und sind aus vielen Anwendungsfeldern nicht mehr wegzudenken. Durch die Verwendung von geeigneten Designs sowie Antriebsprinzipien (elektrostatisch, elektromagnetisch, thermoelektrisch, piezoelektrisch), lassen sich Aktuatoren mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften realisieren, die eine breite Palette an Anwendungen abdecken.

**[0003]** Ein grundlegendes Problem besteht jedoch in der Generierung von hohen Kräften bei hohen Auslenkungen, einer Eigenschaft die insbesondere im Bereich der Fluidverdrängung essenziell ist. Die Ursache hierfür ist, dass Aktuatoren mit großen Auslenkungen niedrige Federsteifigkeiten erfordern, während für die Übertragung von hohen Kräften eher hohe Federsteifigkeiten notwendig sind. Eine Ausnahme bilden lediglich elektrodynamische Antriebe, welche bedingt durch die Tatsache, dass die Kraft über das magnetische Feld generiert wird, auch bei geringen Federkonstanten vergleichsweise hohe Kräfte und Hübe generieren können.

**[0004]** Insbesondere in der Akustik basiert der Großteil aller Bauelemente daher auf elektrodynamischen Antrieben. Ein klassisches Beispiel stellen in Feinwerktechnik gefertigte Lautsprecher für Mobiltelefone dar, bei denen mittels einer sich in einem permanenten Magnetfeld bewegenden Tauchspule ausreichend hohe Hübe und Kräfte zur Luftverdrängung erzeugt werden.

**[0005]** Nachteile dieser konventionellen elektrodynamischen Lautsprecher sind der hohe Leistungsverbrauch von ca. 1 Watt aufgrund der geringen Effizienz sowie hohe akustische Verzerrungen. Diese Lautsprecher verfügen über keinerlei Positionssensorik, so dass die Bewegung der Membran unreguliert ist. Ein weiterer Nachteil ist die relativ große Bauhöhe von 3–4 mm.

**[0006]** Mit MEMS-Technologie könnten diese Nachteile (geringe Effizienz, große Bauhöhe, fehlende Sensorik) überwunden werden. Allerdings gibt es keine MEMS-Lautsprecher auf dem Markt, sondern nur eine Reihe von Publikationen aus Forschungslaboren. In der US 2013/0156253 A1 und in der Literatur [Shahosseini et al., Optimization and Microfabrication of High Performance Silicon-Based MEMS Microspeaker, IEEE Sensors journal, 13 (2013) 273–284] wird ein elektrodynamischer MEMS-Lautsprecher beschrieben, der allerdings die hybride Integration eines Permanentmagnetrings erfordert. Das Konzept von piezoelektrischen MEMS-Lautsprechern wurde in der US 7,003,125, der US 8,280,079, der US 2013/0294636 A1 und in der Literatur [Yi et al., Performance of packaged piezoelectric microspeakers depending on the material properties, Proc. MEMS 2009, 765–768] und [Dejaeger et al., Development and Characterization of a Piezoelectrically Actuated MEMS Digital Loudspeaker, Procedia Engineering 47 (2012) 184–187] dargestellt. Dabei wurden allerdings die piezoelektrischen Materialien wie PZT, AlN oder ZnO direkt auf die Lautsprechermembran aufgebracht, so dass die Eigenschaften des Antriebs und der Membran gekoppelt sind. Ein weiterer piezoelektrischer MEMS-Lautsprecher mit einem plattenförmigen Körper, der über eine Membran oder mehrere Aktuatoren kolbenförmig aus der Ebene ausgelenkt wird, ist in der US 2011/0051985 A1 dargestellt. Digitale MEMS-Lautsprecher auf Basis von Arrays mit elektrostatisch angetriebenen Membranen, die allerdings nur bei hohen Frequenzen ausreichend hohe Schalldrücke erzeugen können, werden in der US 7,089,069, der US 2010/0316242 A1 und in der Literatur [Glacer et al., Reversible acoustical transducers in MEMS technology, Proc. DTIP 2013] beschrieben.

**[0007]** Der vorliegenden Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, ein Konzept zu schaffen, welches gleichzeitig die Realisierung hoher Kräfte und Auslenkungen in MEMS ermöglicht.

**[0008]** Diese Aufgabe wird durch den unabhängigen Patentanspruch 1 gelöst.

**[0009]** Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung schaffen ein MEMS mit einer Membran, einer Hubstruktur, die mit der Membran gekoppelt ist, und zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren, die über eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen mit einer Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten der Hubstruktur verbunden sind, wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren ausgebildet sind, um eine Hubbewegung der Hubstruktur hervorzurufen, um die Membran auszulenken.

**[0010]** Gemäß dem Konzept der vorliegenden Erfindung weist das MEMS (Mikrosystem) zur Anregung einer Membran einen Hubkörper und zumindest zwei piezoelektrische Aktuatoren auf, wobei die zumindest zwei

Aktuatoren über eine Mehrzahl voneinander beabstandeten Verbindungselementen mit einer Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten der Hubstruktur verbunden sind. Dadurch, dass das MEMS zumindest zwei piezoelektrische Aktuatoren aufweist, die über eine Mehrzahl von Verbindungselementen mit der Hubstruktur verbunden sind, ist es möglich, gleichzeitig hohe Kräfte und Auslenkungen über die Hubstruktur auf die Membran zu übertragen. Dadurch, dass die Mehrzahl von Verbindungselementen und damit auch die Mehrzahl von Kontaktpunkten voneinander beabstandet sind, kann sichergestellt bzw. gewährleistet werden, dass die Hubstruktur die Hubbewegung reproduzierbar und gleichmäßig ausübt und beispielsweise nicht von einer gewünschten Richtung der Hubbewegung abweicht, wie dies beispielsweise bei einem Auftreten von Kippmoden der Fall wäre.

**[0011]** Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden bezugnehmend auf die beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

**[0012]** Fig. 1a eine schematische Querschnittsansicht eines MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0013]** Fig. 1b eine schematische Draufsicht des in Fig. 1a gezeigten MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0014]** Fig. 2a eine schematische Querschnittsansicht eines MEMS im aktivierten Zustand, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0015]** Fig. 2b eine schematische Querschnittsansicht des MEMS im Ruhezustand, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0016]** Fig. 3a–d schematische Querschnittsansichten vier verschiedener Ausführungsbeispiele der piezoelektrischen Aktuatoren des MEMS;

**[0017]** Fig. 4a–f schematische Draufsichten sechs verschiedener Ausführungsbeispiele der Hubstruktur des MEMS;

**[0018]** Fig. 5a–h schematische Draufsichten acht verschiedener Ausführungsbeispiele von Anordnungen der piezoelektrischen Aktuatoren bezüglich der Hubstruktur des MEMS;

**[0019]** Fig. 6a–f schematische Draufsichten sechs verschiedener Ausführungsbeispiele der Verbindungselemente des MEMS;

**[0020]** Fig. 7a, b schematische Draufsichten zweier Ausführungsbeispiele eines piezoelektrischen Aktuators mit integriertem Positionssensor;

**[0021]** Fig. 8 eine schematische Querschnittsansicht eines MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0022]** Fig. 9a eine schematische Querschnittsansicht eines MEMS mit einer Membran mit erweitertem Hubkörper, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0023]** Fig. 9b eine schematische Draufsicht des in Fig. 9a gezeigten MEMS mit der Membran und dem erweiterten Hubkörper, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0024]** Fig. 10a eine schematische Querschnittsansicht eines MEMS mit einer flexiblen Membran, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0025]** Fig. 10b eine schematische Draufsicht des in Fig. 10a gezeigten MEMS mit der flexiblen Membran, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0026]** Fig. 11a eine schematische Querschnittsansicht eines MEMS mit einer flexiblen Membran, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0027]** Fig. 11b eine schematische Draufsicht des in Fig. 11a gezeigten MEMS mit der flexiblen Membran, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

- [0028]** Fig. 12a eine Draufsicht eines CAD-Modells des MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0029]** Fig. 12b eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation des in Fig. 12a gezeigten MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0030]** Fig. 13a eine Draufsicht eines CAD-Modells des MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0031]** Fig. 13b eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation des in Fig. 13a gezeigten MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0032]** Fig. 14a eine Draufsicht eines CAD-Modells des MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0033]** Fig. 14b eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation des in Fig. 14a gezeigten MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0034]** Fig. 15a eine Draufsicht eines CAD-Modells des MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0035]** Fig. 15b eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation des in Fig. 15a gezeigten MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0036]** Fig. 16a eine Draufsicht eines CAD-Modells des MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0037]** Fig. 16b eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation des in Fig. 16a gezeigten MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;
- [0038]** Fig. 17a–c schematische Querschnitte des MEMS nach verschiedenen Prozessschritten eines Verfahrens zur Herstellung des MEMS; und
- [0039]** Fig. 18 eine schematische Ansicht eines Systems mit einem MEMS und einer Ansteuereinrichtung zum Ansteuern der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren des MEMS, gemäß einem Ausführungsbeispiel.
- [0040]** In der nachfolgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele der Erfindung werden in den Figuren gleiche oder gleichwirkende Elemente mit dem gleichen Bezugszeichen versehen, so dass deren Beschreibung in den unterschiedlichen Ausführungsbeispielen untereinander austauschbar ist.
- [0041]** Fig. 1a zeigt eine schematische Querschnittsansicht eines MEMS **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, während Fig. 1b eine schematische Draufsicht des in Fig. 1a gezeigten MEMS **100** zeigt. Das MEMS **100** weist eine Membran **102**, eine Hubstruktur **104**, die mit der Membran **102** gekoppelt ist, und zumindest zwei piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) auf, die über eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) mit einer Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) der Hubstruktur **104** verbunden sind, wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) ausgebildet sind, um eine (uni- oder bidirektionale) Hubbewegung der Hubstruktur **104** hervorzurufen, um die Membran **102** auszulenken.
- [0042]** Bei Ausführungsbeispielen können die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) in einer Ruheposition in einer Ebene angeordnet sein, wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) ausgebildet sein können, um eine Hubbewegung der Hubstruktur **104** derart hervorzurufen, dass eine Richtung der Hubbewegung senkrecht zu der Ebene der piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) verläuft. In Fig. 1a ist die Richtung der Hubbewegung durch den Pfeil **114** exemplarisch angedeutet.
- [0043]** Die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) können beispielsweise als Biegebalken implementiert sein. Ferner können die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) in einer Einspannung **118**, beispielsweise einem Halbleitersubstrat, wie z. B. einem Silizium-Halbleitersubstrat, eingespannt sein.

**[0044]** Das in **Fig. 1a** und **Fig. 1b** gezeigte MEMS **100** weist beispielhaft zwei piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) auf. Die Erfindung ist jedoch nicht auf solche Ausführungsbeispiele beschränkt. Vielmehr kann das MEMS **100** bis zu  $n$  piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** aufweisen, wobei  $n$  eine natürliche Zahl größer gleich zwei ist,  $n \geq 2$ .

**[0045]** Bei Ausführungsbeispielen können die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) über eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) mit einer Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) der Hubstruktur **104** verbunden sein.

**[0046]** Wie in **Fig. 1b** beispielhaft zu erkennen ist, kann jeder der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) über zumindest zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) mit zumindest zwei voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) der Hubstruktur **104** verbunden sein.

**[0047]** Beispielsweise kann ein erster piezoelektrischer Aktuator **106\_1** der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) über ein erstes Verbindungselement **110\_1** der Mehrzahl von Verbindungselementen **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) mit einem ersten Kontaktpunkt **110\_1** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) der Hubstruktur **104** verbunden sein, und über ein zweites Verbindungselement **108\_2** der Mehrzahl von Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) mit einem zweiten Kontaktpunkt **110\_2** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) der Hubstruktur **104** verbunden sein.

**[0048]** Genauso kann ein zweiter piezoelektrischer Aktuator **106\_2** der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) über ein drittes Verbindungselement **108\_3** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) mit einem dritten Kontaktpunkt der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) der Hubstruktur **104** verbunden sein, und über ein viertes Verbindungselement **108\_4** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) mit einem vierten Kontaktpunkt **110\_4** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) der Hubstruktur **104** verbunden sein.

**[0049]** Bei Ausführungsbeispielen kann ein Abstand zwischen der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_4** der Hubstruktur maximiert sein, wodurch auch ein Abstand zwischen der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) maximiert wird.

**[0050]** Beispielsweise kann hierzu der erste Kontaktpunkt **110\_1** in einem ersten äußeren Bereich der Hubstruktur **104** angeordnet sein, während der zweite Kontaktpunkt **110\_2** in einem dem ersten äußeren Bereich gegenüberliegenden zweiten äußeren Bereich der Hubstruktur angeordnet sein kann. Genauso kann der dritte Kontaktpunkt **110\_3** in dem ersten äußeren Bereich der Hubstruktur **104** angeordnet sein, während der vierte Kontaktpunkt **110\_4** in dem zweiten äußeren Bereich der Hubstruktur **104** angeordnet sein kann.

**[0051]** Wie in **Fig. 1b** zu erkennen ist, kann die Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) mit einer Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) verbunden sein. Abstände zwischen der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** der Hubstruktur können dabei ebenfalls maximiert sein, wie in **Fig. 1b** zu erkennen ist.

**[0052]** Beispielsweise kann ein erster Kontaktpunkt **112\_1** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) des ersten piezoelektrischen Aktuators **106\_1** in einem ersten äußeren Bereich des ersten piezoelektrischen Aktuators **106\_1** angeordnet sein, während ein zweiter Kontaktpunkt **112\_2** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) in einem dem ersten äußeren Bereich gegenüberliegenden zweiten äußeren Bereich des ersten piezoelektrischen Aktuators **106\_1** angeordnet sein kann. Ein dritter Kontaktpunkt **112\_3** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) des zweiten piezoelektrischen Aktuators **106\_2** kann in einem ersten äußeren Bereich des zweiten piezoelektrischen Aktuators **106\_2** angeordnet sein, während ein vierter Kontaktpunkt **112\_4** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) in einem dem ersten äußeren Bereich gegenüberliegenden zweiten äußeren Bereich des zweiten piezoelektrischen Aktuators **106\_2** angeordnet sein kann.

**[0053]** Das in den **Fig. 1a** und **Fig. 1b** gezeigte MEMS **100** weist beispielhaft vier voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ ) auf, die mit vier voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) der Hubstruktur **104** verbunden sind. Die Erfindung ist jedoch nicht auf solche Ausführungsbeispiele beschränkt. Vielmehr kann das MEMS **100** bis zu  $m$  voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** aufweisen, die mit bis zu  $m$  voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** der Hubstruktur **104** verbunden sind, wobei  $m$  eine natürliche Zahl größer gleich vier ist,  $m \geq 4$ . Hieraus folgt jedoch nicht, dass jeder der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** über zumindest zwei Verbindungselemente mit der Hubstruktur **104** verbunden sein muss. Beispielsweise kann das MEMS **100** auch vier piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) aufweisen, wobei jeder der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) über jeweils ein (einziges) Verbindungselement mit der Hubstruktur **104** verbunden ist.

**[0054]** Wie in **Fig. 1a** und **Fig. 1b** zu erkennen ist, kann die Hubstruktur **104** symmetrisch sein, wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) symmetrisch zu einem Schwerpunkt **120** der Hubstruktur **104** angeordnet sein können. Dabei können die Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **110\_1** bis **110\_m** ( $m = 4$ ) ebenfalls symmetrisch zu dem Schwerpunkt **120** der Hubstruktur **104** angeordnet sein. Genauso können die Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 2$ ) symmetrisch zu dem Schwerpunkt **120** der Hubstruktur **104** angeordnet sein.

**[0055]** Wie bereits erwähnt, ist die Membran **102** bei Ausführungsbeispielen mit der Hubstruktur **104** gekoppelt. Die Membran **102** kann ferner in einem äußeren Bereich **118**, z. B. in einem Halbleitersubstrat, wie z. B. einem Siliziumhalbleitersubstrat, eingespannt sein. Die Membran **102** kann parallel zu einer ersten Oberfläche **122** und/oder einer zweiten Oberfläche **124** des MEMS **100** verlaufen, wobei die Membran **102** ausgebildet sein kann, um bei einer bestimmungsgemäßen Verwendung des MEMS **100** die erste Oberfläche **122** und die zweite Oberfläche **124** des MEMS **100** fluidisch oder gasförmig voneinander zu trennen.

**[0056]** Die Ebene, in der die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** und **106\_n** ( $n = 2$ ) in einer Ruheposition angeordnet sind, könnten dabei parallel zu der ersten und/oder zweiten Oberfläche **122** und **124** des MEMS **100** verlaufen.

**[0057]** Im Folgenden werden Ausführungsbeispiele des MEMS **100** anhand der **Fig. 2** bis **Fig. 16** näher erläutert. Die nachfolgende Beschreibung ist jedoch genauso auf das in **Fig. 1a** und **Fig. 1b** gezeigte MEMS **100** anwendbar. Genauso sind Merkmale, die in Bezug auf das in den **Fig. 1a** und **Fig. 1b** gezeigte MEMS **100** beschrieben wurden, auf die nachfolgenden Ausführungsbeispiele anwendbar.

**[0058]** Die nachfolgenden Ausführungsbeispiele beschreiben dabei ein Konzept und einen Aufbau eines Mikroaktuator für große Hübe und Kräfte, der eine hohe Effizienz aufweist und mit Verfahren der Silizium-Mikrosystemtechnik gefertigt werden kann. Der Aktuator kann beispielsweise für einen Lautsprecher verwendet werden. Der entscheidende Vorteil von Chip-basierten Lautsprechern gegenüber konventionellen Lautsprechern ist die Möglichkeit, komplexe und hochpräzise Geometrien herzustellen und damit neue Schallerzeugungskonzepte zu realisieren. Die MEMS-Aktuatoren können zudem durch Integration einer Positionssensorik geregelt betrieben werden.

**[0059]** Für die Realisierung von hohen Kräften und Hüben schaffen Ausführungsbeispiele ein MEMS **100**, welches auf effizient angeordneten Aktuatorelementen basiert, die über geeignete Verbindungselemente (siehe **Fig. 6a** bis **Fig. 6f**) mit einem als starr angenommenen Hubkörper **104**, der als Rahmenstruktur ausgebildet sein kann, verbunden sind (siehe **Fig. 2a** und **Fig. 2b**). Die Aktuatorelemente **106\_1** bis **106\_n** können gleichzeitig angesteuert werden, so dass der Rahmen **104** parallel (zu einer Richtung der Hubbewegung, die senkrecht auf einer Ebene der Aktuatorelemente **106\_1** bis **106\_n** steht), d. h. möglichst ohne Verkippung aus der Ebene bewegt wird.

**[0060]** **Fig. 2a** zeigt eine schematische Querschnittsansicht des MEMS **100** im aktivierten Zustand, während **Fig. 1b** eine schematische Querschnittsansicht des in **Fig. 2a** gezeigten MEMS **100** (Aktuatoranordnung) im Ruhezustand zeigt. Bei den Aktuatoren **106\_1** und **106\_n** ( $n = 2$ ) handelt es sich um einseitig eingespannte Biegebalken (welche z. B. in einem äußeren Bereich in einer Einspannung **118**, z. B. einem Rahmen, wie z. B. eine Siliziumrahmen, eingespannt sein können), und welche gemäß **Fig. 3a** bis **Fig. 3d** mindestens zwei Schichten aufweisen, von denen wenigstens eine piezoelektrisch ist. **Fig. 3a** bis **Fig. 3d** zeigen dabei schematische Querschnitte möglicher Aktuatorelemente. Im Detail, Unimorph mit einer piezoelektrischen Funktionsschicht **133** (und einer passiven Schicht **135**) in **Fig. 3a**, symmetrisch und Bimorph mit zwei piezoelektrischen

Schichten **133a** und **133b** (und einer dazwischen angeordneten passiven Schicht **135**) in **Fig. 3b**, symmetrisch Bimorph mit einer dünnen leitfähigen Trennschicht **137** zwischen zwei piezoelektrischen Schichten **133a** und **133b** in **Fig. 3c**, und asymmetrisch Bimorph mit zwei mittels einer Trennschicht **137** separierter piezoelektrischer Schichten **133a** und **133b** (auf einer passiven Schicht **135**) in **Fig. 3d**.

**[0061]** Zur Kontaktierung können die piezoelektrischen Schichten mit entsprechenden Elektroden versehen werden, welche entweder als flächige oder interdigitale Elektroden oder einer Kombination aus flächigen und interdigitalen Elektroden ausgeführt sein können. Neben piezoelektrisch aktiven Schichten können die Aktuatorelemente eine oder mehrere passive oder piezoelektrisch inaktive Funktionsschichten aufweisen.

**[0062]** Durch Anlegen einer elektrischen Spannung verformt sich das piezoelektrische Material und ruft eine Verbiegung der einzelnen Aktuatorelemente **106\_1** bis **106\_n** hervor, über die der Hubkörper bzw. die Hubstruktur **104** nach oben oder unten aus der Ebene bewegt wird. Während sich hohe Auslenkungen prinzipiell nur über möglichst lange und dünn-schichtige Aktuatoren realisieren lassen, erfordern Aktuatoren für hohe Kräfte eher kurze Längen. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass lange Aktuatoren zu geringe Federsteifigkeiten aufweisen um hohe Kräfte zu generieren. Zur Überwindung dieser gegensätzlichen Anforderungen basieren die vorgeschlagenen Designkonzepte auf mehreren Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n**, welche aufgrund ihrer Längen hohe Auslenkungen erzielen, bedingt durch ihre Anzahl in Summe aber ebenfalls hohe Kräfte bereitstellen können. Somit lässt sich der mögliche Hub des Hubkörpers **104** primär über die Länge der Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** definieren, während sich die erzielbare Kraft über die Breite und Anzahl der Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** skalieren lässt.

**[0063]** **Fig. 4a** bis **Fig. 4f** zeigen schematische Draufsichten sechs verschiedener Ausführungsbeispiele der Hubstruktur **104** des MEMS **100**.

**[0064]** **Fig. 4a** zeigt dabei eine Hubstruktur **104**, die in einer Ebene, die senkrecht zu der Richtung der Hubbewegung der Hubstruktur **104** verläuft, H-förmig ist. Beispielsweise kann die Hubstruktur **104** zumindest drei Abschnitte **104a** bis **104c** aufweisen, die H-förmig angeordnet sind, so dass die Hubstruktur **104** in der Schnittebene, die senkrecht zu der Hubbewegungsrichtung der Hubstruktur verläuft, H-förmig ist. Die drei Abschnitte **104a** bis **104c** können dabei, wie in **Fig. 4a** zu erkennen ist, einen (zusammenhängenden) Hubkörper bilden.

**[0065]** Die Hubstruktur **104**, oder mit anderen Worten, die Abschnitte **104a** bis **104c** können dabei eine Fläche aufspannen, die zumindest 30% (oder 80%, 70%, 60%, 50% oder 40%) einer Fläche der Membran **102** entspricht.

**[0066]** Dabei kann die Hubstruktur **104** derart ausgebildet sein, dass die Hubstruktur **104** zumindest über den ersten Abschnitt **104a** und den zweiten Abschnitt **104b** (und optional über den dritten Abschnitt **104c**) mit der Membran gekoppelt ist. Die Stirnseiten des ersten Abschnitts **104a** und des zweiten Abschnitts **104b** bilden somit eine Mehrzahl von verteilt angeordneten Bereichen, über die die Hubstruktur **104** mit der Membran **102** gekoppelt ist.

**[0067]** Natürlich kann die Hubstruktur **104** auch derart ausgebildet sein, dass die Hubstruktur **104** (punktförmig) über eine Mehrzahl von verteilt angeordneten Bereichen mit der Membran **102** gekoppelt ist. Die Mehrzahl von verteilt angeordneten Bereichen können beispielsweise Bereiche des ersten Abschnitts **104a** und des zweiten Abschnitts **104b** (und optional des dritten Abschnitts **104c**) sein.

**[0068]** Ferner ist es auch möglich, dass zumindest der erste Abschnitt **104a** und der zweite Abschnitt **104b** (und optional der dritte Abschnitt **104c**) jeweils über einen Abstandshalter, der querschnittsflächenmäßig kleiner oder größer sein kann als der jeweilige Abschnitt **104a** und **104b**, mit der Membran gekoppelt ist. In diesem Fall bilden die Abstandshalter eine Mehrzahl von verteilt angeordneten Bereichen, über die die Hubstruktur **104** mit der Membran **102** gekoppelt ist.

**[0069]** Die Mehrzahl von verteilt angeordneten Bereichen (z. B. Stirnseiten oder punktförmige Bereiche der Abschnitte **104a** und **104b**) können dabei entlang von Geraden angeordnet sein, entlang derer die Hubstruktur **104** mit der Membran **102** gekoppelt ist. In **Fig. 4a** sind diese zwei Geraden (definiert durch die Abschnitte **104a** und **104b**) parallel zueinander angeordnet. Jedoch ist es natürlich auch denkbar, dass diese zwei Geraden sich in zumindest einem Punkt schneiden, d. h. nur teilweise voneinander beabstandet sind, was beispielsweise durch eine V- oder L-förmige Struktur erreicht werden kann, oder durch eine Zusammensetzung mehrerer Strukturen, z. B. I-förmiger und L-förmiger Strukturen zu einer H-Struktur.

**[0070]** Da insbesondere die Kraft stark von der Aktuatorfläche abhängt, verfügen die in den **Fig. 4a** bis **Fig. 4f** gezeigten Designs über einen Hubkörper **104**, der so ausgelegt ist, dass er eine möglichst geringe Fläche einnimmt, gleichzeitig aber über eine ausreichende Steifigkeit verfügt, die eine nennenswerte Verformung des Hubkörpers unterbindet. Der Hubkörper **104** kann als verzweigte, zu den Seiten hin offene Rahmenstruktur ausgebildet sein, so dass die Aktuatorelemente zwischen oder neben den Balken des Rahmens angeordnet werden können und den Rahmen dort angreifen können. Durch die reduzierte Fläche steht der Großteil der aktiven Fläche **130** (vorzugsweise rechteckige Fläche, die die beweglichen Elemente Aktuator, Hubkörper u. Verbindungselemente einnimmt) für die Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** zur Verfügung. Im Hinblick auf eine möglichst effiziente Aktuatoranordnung kann der Hubkörper **104** darüber hinaus so ausgelegt sein, dass die Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** zwischen Aktuator und Hubkörper **104** einen möglichst großen Abstand zum Schwerpunkt des Hubkörpers **104** aufweisen. Hierdurch lassen sich ungewollte Kippmoden relativ zur gewollten Hubmode im Frequenzbereich nach oben verschieben, wodurch parasitäre Schwingungen im Betrieb reduziert werden können.

**[0071]** **Fig. 4a** bis **Fig. 4f** zeigen dabei schematische Draufsichten von Beispielen unterschiedlicher Formen des verzweigten starren Hubkörpers **104**. Im Detail, ein Hubkörper mit drei miteinander verbundenen Balkenelementen **104a** bis **104c** in **Fig. 4a**, ein Hubkörper mit zusätzlichen Streben (oder Balken) **104d** in **Fig. 4b** und **Fig. 4c**, ein Hubkörper mit lokalen Verbreiterungen **182** in **Fig. 4d**, ein Hubkörper **104** mit Rundungen in **Fig. 4e** und ein Hubkörper **104** mit diagonalen Elementen **104c** bis **104f** in **Fig. 4f**.

**[0072]** Wie in den **Fig. 4a** bis **Fig. 4f** zu erkennen ist, kann der Hubkörper **104** beispielhaft aus starren Balkenelementen zusammengesetzt sein.

**[0073]** Beispielsweise kann der Hubkörper **104** mindestens zwei Balkenelemente **104a** und **104b** aufweisen, welche direkt oder über ein drittes Balkenelement **104c** miteinander verbunden sind (siehe **Fig. 4a**). Ferner kann der Hubkörper **104** zusätzliche horizontal angeordnete Balkenelemente **104d** aufweisen (siehe **Fig. 4b**), welche unterschiedliche Längen aufweisen können und durch Streben untereinander verbunden sein können. Des Weiteren kann der Hubkörper **104** zusätzliche senkrecht angeordnete Balkenelemente **104d** aufweisen (siehe **Fig. 4c**), deren Länge identisch oder verschieden zu anderen horizontalen Elementen sein kann. Ferner kann der Hubkörper **104** lokale Verbreiterungen **182** oder Platten (z. B. zur Bereitstellung von Montageflächen oder Positionierung von Verbindungselementen) aufweisen (siehe **Fig. 4d**). Darüber hinaus kann der Hubkörper **104** diagonal angeordnete Balkenelemente und/oder abgerundete Konturen aufweisen. Der Hubkörper **104** kann ein quadratisches, rechteckiges oder trapezförmiges Querschnittsprofil aufweisen, Ferner kann der Hubkörper eine zentrierte Ausrichtung innerhalb der aktiven Fläche **130** aufweisen.

**[0074]** Die in **Fig. 4a** bis **Fig. 4f** gezeigten Hubstrukturen **104** weisen jeweils einen (zusammenhängen) Hubkörper auf. Die Erfindung ist jedoch nicht auf solche Ausführungsbeispiele beschränkt. Vielmehr kann die Hubstruktur **104** bei Ausführungsbeispielen auch zwei oder mehr Hubkörper aufweisen. Die Hubkörper können dabei beispielsweise über einen Streifen oder einen erweiterten Hubkörper (vgl. **Fig. 8**) miteinander gekoppelt oder verbunden sein.

**[0075]** **Fig. 5a** bis **Fig. 5h** zeigen schematische Draufsichten acht verschiedener Ausführungsbeispiele von Anordnungen der piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** bezüglich der Hubstruktur **104** des MEMS, wobei in den **Fig. 5a** bis **Fig. 5h** die Membran **102** jeweils nicht dargestellt ist, um die Sicht auf die Hubstruktur **104** und die zumindest zwei piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** nicht zu beeinträchtigen.

**[0076]** In den in **Fig. 5a** bis **Fig. 5h** gezeigten Ausführungsbeispielen weist die Hubstruktur **104** zumindest drei Abschnitte **104a** bis **104c** auf, die angeordnet sind, um eine H-förmige Hubstruktur **104** zu bilden, so dass die Hubstruktur **104** in einer Schnittebene, die senkrecht zu der Richtung **114** der Hubbewegung der Hubstruktur **104** verläuft, H-förmig ist (analog zu **Fig. 4a**).

**[0077]** Dabei sind der erste Abschnitt **104a** und der zweite Abschnitt **104b** parallel zueinander angeordnet, während der dritte Abschnitt **104c** senkrecht zu dem ersten Abschnitt **104a** und dem zweiten Abschnitt **104b** angeordnet ist, um die H-förmige Hubstruktur zu bilden.

**[0078]** Wie in **Fig. 5a** zu erkennen ist, kann das MEMS **100** zwei piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** und **106\_n** ( $n = 2$ ) aufweisen, die zumindest teilweise innerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** entlang des dritten Abschnitts **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet sind und jeweils über zumindest zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** mit der Hubstruktur **104** verbunden sind.

**[0079]** Im Detail ist in **Fig. 5a** der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** über zwei Verbindungselemente **108\_1** und **108\_2** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ , optional  $m = 6$ ) mit der Hubstruktur **104** verbunden, wobei der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** über zwei Verbindungselemente **108\_3** und **108\_4** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 4$ , optional  $m = 6$ ) mit der Hubstruktur **104** verbunden ist.

**[0080]** Ein erster Kontaktpunkt **112\_1** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) des ersten piezoelektrischen Aktuators **106\_1** kann in einem ersten äußeren Bereich des ersten piezoelektrischen Aktuators **106\_1** angeordnet sein, so dass das erste Verbindungselement **108\_1** benachbart zu dem ersten äußeren Bereich angeordnet ist, während ein zweiter Kontaktpunkt **112\_2** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) in einem dem ersten äußeren Bereich gegenüberliegenden zweiten äußeren Bereich des ersten piezoelektrischen Aktuators **106\_1** angeordnet sein kann, so dass das zweite Verbindungselement **108\_2** benachbart zu dem zweiten äußeren Bereich angeordnet ist. Genauso kann ein dritter Kontaktpunkt **112\_3** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) des zweiten piezoelektrischen Aktuators **106\_2** in einem ersten äußeren Bereich des zweiten piezoelektrischen Aktuators **106\_2** angeordnet sein, so dass das dritte Verbindungselement **108\_1** benachbart zu dem ersten äußeren Bereich angeordnet ist, während ein vierter Kontaktpunkt **112\_4** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 4$ ) in einem dem ersten äußeren Bereich gegenüberliegenden zweiten äußeren Bereich des zweiten piezoelektrischen Aktuators **106\_2** angeordnet sein kann, so dass das vierte Verbindungselement **108\_4** benachbart zu dem zweiten äußeren Bereich angeordnet ist. Solche Verbindungselemente werden im Folgenden als äußere Verbindungselemente bzw. außen liegende Verbindungselemente bezeichnet.

**[0081]** Optional kann der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** ferner über ein fünftes Verbindungselement **108\_5** mit der Hubstruktur verbunden sein, wobei ein fünfter Kontaktpunkt **112\_5** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 6$ ) des ersten piezoelektrischen Aktuators **106\_1** in einem mittigen bzw. zentralen Bereich angeordnet sein kann, so dass das fünfte Verbindungselement **108\_5** benachbart zu dem mittigen Bereich angeordnet ist. Genauso kann der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** ferner über ein sechstes Verbindungselement **108\_6** mit der Hubstruktur **104** verbunden sein, wobei ein sechster Kontaktpunkt **112\_6** der Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten **112\_1** bis **112\_m** ( $m = 6$ ) des zweiten piezoelektrischen Aktuators **106\_2** in einem mittigen bzw. zentralen Bereich angeordnet sein kann, so dass das sechste Verbindungselement **108\_6** benachbart zu dem mittigen Bereich angeordnet ist. Solche Verbindungselemente werden im Folgenden als mittige Verbindungselemente bzw. mittig liegende Verbindungselemente bezeichnet.

**[0082]** **Fig. 5b** zeigt eine schematische Draufsicht eines MEMS **100** mit vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ), die zumindest teilweise innerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** angeordnet sind, wobei zwei piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** und **106\_2** der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) entlang einer ersten Seite des dritten Abschnitts **104c** angeordnet sind, wobei zwei weitere piezoelektrische Aktuatoren **106\_3** und **106\_4** der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) entlang einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite des dritten Abschnitts **104c** angeordnet sind. Die vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) sind dabei jeweils über zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_4** und optional über jeweils ein mittig liegendes Verbindungselement **108\_5** und **108\_6** mit dem dritten Abschnitt **104c** der Hubstruktur **104** verbunden.

**[0083]** **Fig. 5c** zeigt ebenfalls eine schematische Draufsicht eines MEMS **100** mit vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ), wobei zwei piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** und **106\_4** der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) mit dem ersten Abschnitt **104a** über jeweils zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_4** (und optional über ein weiteres mittig liegendes Verbindungselement) mit der Hubstruktur **104** verbunden sind, wobei zwei weitere piezoelektrische Aktuatoren **106\_2** und **106\_3** der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) über jeweils zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_5** bis **108\_8** (und optional über ein weiteres mittig liegendes Verbindungselement) mit dem zweiten Abschnitt **104b** der Hubstruktur **104** verbunden ist.

**[0084]** **Fig. 5d** zeigt eine schematische Draufsicht eines MEMS **100** mit acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ), die zumindest teilweise innerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** angeordnet sind, so dass vier piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_4** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) über jeweils zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_8** mit dem ersten Abschnitt **104a** der Hubstruktur **104** verbunden sind, wobei vier weitere piezoelektrischen Aktuatoren **106\_5** bis **106\_8** der acht

piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) über jeweils zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_9** bis **108\_16** mit dem zweiten Abschnitt **104b** der Hubstruktur **104** verbunden sind.

**[0085]** Fig. 5e zeigt eine schematische Draufsicht eines MEMS **100** mit zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** und **106\_n** ( $n = 2$ ), die außerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** angeordnet sind. Dabei ist der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** entlang des ersten Abschnitts **104a** der Hubstruktur **104** angeordnet, wobei der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** entlang des zweiten Abschnitts **104b** der Hubstruktur **104** angeordnet ist. Der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** ist über zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_1** und **108\_4** mit dem ersten Abschnitt **104a** der Hubstruktur **104** verbunden, während der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** über zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_2** und **108\_3** mit dem zweiten Abschnitt **104b** der Hubstruktur **104** verbunden ist. Optional können der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** und der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** jeweils über ein mittig liegendes Verbindungselement **108\_5** und **108\_6** mit dem jeweiligen Abschnitt **104a** und **104b** der Hubstruktur **104** verbunden sein.

**[0086]** Fig. 5f zeigt eine schematische Draufsicht eines MEMS **100** mit vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ), die außerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** angeordnet sind. Der erste und vierte piezoelektrische Aktuator **106\_1** und **106\_4** sind entlang des ersten Abschnitts **104a** der Hubstruktur **104** angeordnet und mit diesem über jeweils zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_4** verbunden. Der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** und der dritte piezoelektrische Aktuator **106\_3** sind dabei entlang des zweiten Abschnitts **104b** der Hubstruktur **104** angeordnet und mit diesem über jeweils zwei außen liegende Verbindungselemente **108\_5** bis **108\_8** verbunden.

**[0087]** Fig. 5g und Fig. 5h zeigen jeweils ein MEMS **100** mit vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ), die außerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** angeordnet sind. Die vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_4** sind jeweils über ein Verbindungselement **108\_1** bis **108\_4** mit dem jeweiligen Abschnitt **104a** oder **104b** der Hubstruktur **104** verbunden. Der Unterschied zwischen den Fig. 5g und Fig. 5h liegt darin, dass die vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_4** in der Fig. 5g so angeordnet sind, dass die Kontaktpunkte zwischen der Hubstruktur **104** und den Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_4** an äußeren Enden der Abschnitte **104a** und **104b** angeordnet sind, während in Fig. 5h die vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_4** so angeordnet sind, dass die Kontaktpunkte zwischen den Verbindungselementen **108\_1** bis **108\_4** und der Hubstruktur **104** benachbart zu einer projizierten Verlängerung des dritten Abschnitts **104c** angeordnet sind.

**[0088]** Fig. 5a bis Fig. 5h veranschaulichen somit unterschiedliche Teil-Aktuatorkonfigurationen am Beispiel des Hubköpers aus Fig. 4a. Je nach Anordnung handelt es sich um einseitig eingespannte Aktuatoren, welche über mindestens ein, jedoch vorzugsweise zwei oder mehr Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** mit dem Hubkörper **104** verbunden sind und diesen aus der Ebene bewegen. Zur Erzielung möglichst hoher Kräfte sind die Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** vorzugsweise breit ausgelegt, wodurch es aufgrund des in der Ebene wirkenden piezoelektrischen Effekts zu einer Querverwölbung kommt. Letzteres äußert sich darin, dass die äußeren Ecken am freien Ende des Aktuators die höchste Auslenkung aufweisen und somit die optimale Position für die Verbindungselemente darstellen. Insbesondere bei sehr breiten Aktuatoren kann das Einfügen weiterer Verbindungselemente (in Fig. 5a bis Fig. 5h als optionale Verbindungselemente bezeichnet) vorteilhaft sein um höhere Kräfte zu erzielen und die Hubmode im Frequenzbereich nach oben zu verschieben. Abhängig von der Geometrie des Hubkörpers **104** kann darüber hinaus auch eine Unterteilung einzelner Aktuatoren in mehrere, vorzugsweise parallel zueinander angeordnete, Aktuatoren sinnvoll sein (z. B. Fig. 4c in Kombination mit Fig. 5b). Im Hinblick auf eine möglichst gute Flächenausnutzung zur Realisierung hoher Kräfte lassen sich die in Fig. 5a bis Fig. 5h dargestellten Teil-Konfigurationen beliebig miteinander kombinieren.

**[0089]** Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den in Fig. 5a–h gezeigten unterschiedlichen Aktuatorkonfigurationen am Beispiel des Hubkörpers **104** aus Fig. 4a um Teil-Aktuatorkonfigurationen handelt, die sich beliebig miteinander kombinieren lassen.

**[0090]** Bei Ausführungsbeispielen kann eine Querschnittsfläche der Hubstruktur **104** senkrecht zu einer Richtung **114** der Hubbewegung der Hubstruktur **104** kleiner sein (z. B. um den Faktor zwei (oder drei, vier, fünf oder sechs) kleiner sein) als eine Summe von piezoelektrisch aktiven Aktuatorflächen der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n**.

**[0091]** Die Aktuatorkonfigurationen können somit eine hohe Flächenausnutzung durch Aktuatoren von größer 40% (oder 50%, 60%, 70% oder 80%) der aktiven Fläche **130** aufweisen. Ferner können die Aktuatorkonfigurationen beliebig miteinander kombiniert werden. Ferner können die Aktuatorkonfigurationen zusätzliche Ver-

bindungselemente am freien Ende der einzelnen Aktuatoren aufweisen. Des Weiteren können die Aktuator-konfigurationen in mehrere schmale Aktuatoren unterteilte Aktuatoren mit zusätzlichen Verbindungselementen aufweisen (siehe **Fig. 5b**, **Fig. 5d** und **Fig. 5f**). Darüber hinaus können die Aktuatorkonfigurationen Aktuatoren mit trapezförmigen oder gerundeten Formen aufweisen.

**[0092]** Wie bereits in Bezug auf **Fig. 4a** bis **Fig. 4f** erwähnt wurde, kann die Hubstruktur **104** bei Ausführungsbeispielen auch zwei oder mehr Hubkörper aufweisen, wobei die Hubkörper z. B. über einen steifen erweiterten Hubkörper miteinander gekoppelt werden können. Beispielsweise könnte in **Fig. 5e** auf den mittleren Balken **104c** verzichtet werden, sodass die Hubstruktur **104** zwei voneinander getrennte Hubkörper aufweist, die sich mittels eines erweiterten Hubkörpers (vgl. **Fig. 8**) miteinander koppeln ließen. Der frei gewordene Bereich ließe sich in diesem Fall effizienter durch andere Aktuatoren nutzen. Darüber hinaus wäre es denkbar mehrere Hubkörper einer Arrayanordnung über einen erweiterten Hubkörper in Verbindung mit Abstandhaltern zu koppeln.

**[0093]** **Fig. 6a** bis **Fig. 6f** zeigen schematische Draufsichten sechs verschiedener Ausführungsbeispiele der Verbindungselemente des MEMS **100**. Im Detail ist in **Fig. 6a** bis **Fig. 6f** ist jeweils beispielhaft das erste Verbindungselement **108\_1** gezeigt, welches den ersten piezoelektrischen Aktuator **106\_1** mit der Hubstruktur **104** verbindet. Die nachfolgende Beschreibung ist jedoch genauso auf die anderen Verbindungselemente **108\_2** bis **108\_m** übertragbar.

**[0094]** Bei Ausführungsbeispielen kann das Verbindungselemente **108\_1** ein Federelement aufweisen. Wie in den **Fig. 6a** bis **Fig. 6h** zu erkennen ist, kann das Federelement zumindest ein Biegefederelement **108B** (siehe **Fig. 6a**), zumindest ein Torsionsfederelement **108T** (siehe **Fig. 6b**) oder eine Kombination aus zumindest einem Biegefederelement **108B** und zumindest einem Torsionsfederelement **108T** umfassen (siehe **Fig. 6c** bis **Fig. 6f**).

**[0095]** Um eine flexible und gleichzeitig robuste Verbindung zwischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** und Hubkörper **104** sicherzustellen, können verschiedene Federgeometrien Verwendung finden. **Fig. 6a** bis **Fig. 6f** veranschaulichen einige Federanordnungen, welche bei angemessener Dimensionierung zum einen eine ausreichend hohe Flexibilität aufweisen um hohe Auslenkungen zu ermöglichen, zum anderen aber auch eine gute Kraftübertragung zwischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** und Hubkörper **104** gewährleisten. Bedingt durch die Tatsache, dass sowohl Biegefedern **108B** als auch Torsionsfedern **108T** vergleichsweise große Abstände zwischen Aktuator und Hubkörper erfordern (Abstand Federlänge), empfiehlt sich der Einsatz von kombinierten Federgeometrien. **Fig. 6c** bis **Fig. 6f** veranschaulichen entsprechende Geometrien, bei denen die effektive Federlänge durch mehrere vorzugsweise senkrecht zueinander angeordnete Elemente deutlich über dem Abstand zwischen Aktuator und Hubkörper liegen kann. Während sich Anordnungen wie **Fig. 6d** oder **Fig. 6f** insbesondere für Verbindungselemente eignen, die an äußeren Aktuatorecken angeordnet sind, eignen sich Federn wie in **Fig. 6c** und **Fig. 6e** aufgrund ihrer Symmetrie vorwiegend für Verbindungspunkte zwischen den Ecken (siehe optionale Verbindungselemente in **Fig. 5a** bis **Fig. 5h**).

**[0096]** Es sei darauf hingewiesen, dass bei den in **Fig. 6a** bis **Fig. 6f** gezeigten schematischen Draufsicht unterschiedlicher Verbindungselemente, die als Hubkörper **104** und Aktuator **106\_1** bezeichnete Elemente beispielhaft sind und lediglich Ausschnitte der tatsächlichen Funktionselemente darstellen.

**[0097]** Abgesehen von der Skalierung einzelner Elemente sind folgende Abweichungen von **Fig. 6** denkbar. (1) Die in den **Fig. 6a** bis **Fig. 6h** als Biegefedern bezeichneten Abstandshalter zwischen Aktuator und Torsionsfedern können auch als starre Elemente oder piezoelektrisch aktive Verlängerungen des Aktuators ausgelegt sein. (2) Die in **Fig. 6** als lokale Verbreiterungen des Hubkörpers **104** dargestellten Abstandshalter zwischen Federn und Hubkörper **104** können auch als flexible Elemente ausgelegt sein. (3) Alle oder einzelne Federelemente können Rundungen aufweisen. (4) Es können mehrere Federelemente miteinander kombiniert bzw. in mehrfacher Ausführung hintereinander angeordnet sein (Kaskadierung). (5) Die einzelnen Federelemente können Winkel ungleich 90° aufweisen, so dass die Federn sowohl einer Biege- als auch Torsionsbelastung ausgesetzt sind. (6) Alle Federn oder Abstandshalter können auch seitlich an den Aktuatoren befestigt sein (vgl. **Fig. 6b**). (7) Federn und Abstandshalter können aus denselben oder einzelnen passiven und/oder piezoelektrischen Funktionsschichten bestehen wie die Aktuatoren. Alternativ können auch andere Materialien verwendet werden.

**[0098]** Zur Detektierung der Position der Hubstruktur bzw. des Hubkörpers **104** kann das MEMS **100** zusätzlich zumindest ein Sensorelement aufweisen, wie dies im Folgenden anhand von **Fig. 7a** und **Fig. 7b** erläutert wird.

**[0099]** Fig. 7a und Fig. 7b zeigen schematische Draufsichten zweier Ausführungsbeispiele eines piezoelektrischen Aktuators mit integriertem Positionssensor. Im Detail ist in Fig. 6a und Fig. 7b jeweils beispielhaft die Integration des Positionssensors mit dem ersten piezoelektrischen Aktuator **106\_1** gezeigt. Die nachfolgende Beschreibung ist jedoch genauso auf die anderen piezoelektrischen Aktuatoren **106\_2** bis **106\_n** anwendbar.

**[0100]** Wie in Fig. 7a zu erkennen ist, können der piezoelektrische Positionssensor und der piezoelektrische Aktuator **106\_1** durch eine piezoelektrische Schicht gebildet werden, wobei ein Bereich als Sensor und ein anderer als Aktuator genutzt werden kann. Ferner ist es möglich, dass ein Stapel von zwei piezoelektrischen Schichten verwendet wird, wobei eine oder zwei Schichten zumindest teilweise den zumindest einen piezoelektrischen Sensor **140** bildet, wobei eine andere der zwei Schichten den piezoelektrischen Aktuator **106\_1** bildet. Mit anderen Worten, Fig. 7a und Fig. 7b zeigen schematische Draufsichten einer (zusammenhängenden) Balkenstruktur mit voneinander getrennter Sensorbereiche **140** und Aktuatorbereiche **142**. Natürlich muss nicht die gesamte Schicht für den Sensor genutzt werden. Es wäre auch denkbar, dass ein großer Teil für die Aktorik und nur ein kleiner Bereich für den Sensor verwendet wird.

**[0101]** Um die Verluste an Aktuator-Performance (Auslenkung, Kraft), welche aus dem zusätzlichen Platzbedarf von Sensor- und Verbindungselementen resultieren, möglichst gering zu halten, können die Sensorelektroden auch direkt auf den als Aktuatoren genutzten Balkenstrukturen realisiert werden. Fig. 7a und Fig. 7b veranschaulicht zwei Beispiele, bei denen jeweils eine Sensorelektrode (Sensor-Bereich) einen vergleichsweise kleinen Teil der Aktuatorfläche einnimmt. Die Sensorelektroden sind elektrisch von den Aktuatorelektroden isoliert und können sowohl als flächige als auch interdigitale Elektroden ausgeführt sein.

**[0102]** Eine weitere, noch effizientere Möglichkeit besteht in der Nutzung mehrerer piezoelektrischer Schichten (vgl. Fig. 3a bis Fig. 3d), wobei eine Schicht zumindest partiell für die Positionsdetektierung verwendet wird. Da sich die Anforderungen für Sensorik und Aktuatorik unterscheiden können, ist auch eine Kombination verschiedener piezoelektrischer Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften denkbar (z. B. PZT für Aktuatorik, AlN für Sensorik). Alternativ zu Anordnungen, bei denen mehrere piezoelektrische Schichten übereinander angeordnet sind (vgl. Fig. 3a bis Fig. 3d), können sich die Sensor- sowie Aktuator-Materialien analog zu Fig. 7a und Fig. 7b auch nebeneinander befinden.

**[0103]** Aufgrund der Bidirektionalität des piezoelektrischen Effekts können einzelne Aktuatoren auch als Sensorelement verwendet werden. In diesem Fall wird die über den direkten piezoelektrischen Effekt generierte Spannung, welche näherungsweise proportional zur Auslenkung des Hubkörpers **104** ist, über die Aktuator-Elektroden abgegriffen und entsprechend ausgewertet. Damit die Auslenkung möglichst wenig behindert wird, eignen sich insbesondere vergleichsweise lange und schmale Aktuatorelemente. Um einer ungewollten Verkipfung des Hubkörpers **104** aufgrund eines asymmetrischen Antriebs vorzubeugen, sollten entsprechende Sensorelemente vorzugsweise jeweils paarweise gegenüber angeordnet sein.

**[0104]** Anstelle des oder zusätzlich zu dem zumindest einen piezoelektrischen Positionssensor kann das MEMS auch zumindest einen piezoresistiven oder einen kapazitiven Positionssensor aufweisen, der ausgebildet ist, um ein von der Auslenkung der Membran abhängiges Sensorsignal bereitzustellen.

**[0105]** Während in Fig. 1a bis Fig. 2 und Fig. 4a bis Fig. 5a ein Hubkörper bzw. eine Hubstruktur **104** mit möglichst geringer Fläche zur Maximierung von Auslenkung und Kraft angestrebt wurde, erfordern viele Anwendungen jedoch einen Hubkörper **104** mit möglichst großer, vorzugsweise durchgehender Fläche. Beispielsweise wird dadurch bei fluidischen Anwendungen das verdrängte Gas- oder Flüssigkeitsvolumen vergrößert. Durch Bereitstellung von geeigneten Montageflächen kann der Hubkörper **104** daher so ausgelegt werden, dass ein weiterer, vorzugsweise starrer und großflächiger Körper **150** auf oder unter dem Hubkörper **104** befestigt werden kann, wie dies in Fig. 8 gezeigt ist. Der erweiterte Hubkörper **150** kann eine beliebige Geometrie aufweisen und über die aktive, aus Hubkörper und Federelementen aufgespannte Fläche **130** (vgl. Fig. 4a bis Fig. 4h) hinausragen. Fig. 8 veranschaulicht dies anhand einer dünnen Platte **150**, die an entsprechenden Auflagepunkten mit dem Hubkörper **104** fest verbunden ist. Beispielsweise kann das MEMS **100** einen durch eine aufgeklebte Platte **150** erweiterten Hubkörper aufweisen.

**[0106]** Fig. 8 zeigt eine schematische Querschnittsansicht des MEMS **100**, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Das MEMS **100** kann einen erweiterten Hubkörper **150** aufweisen, der mit dem Hubkörper **104** gekoppelt ist. Der erweiterte Hubkörper **150** kann beispielsweise senkrecht zu der Hubbewegungsrichtung **114** des Hubkörpers angeordnet sein und mit einer Stirnseite des Hubkörpers gekoppelt oder verbunden sein.

**[0107]** Da sich Aktuatoren mit hohen Hüben und Kräften insbesondere für die Verdrängung von Gasen und Flüssigkeiten eignen (vgl. technische Anwendungsgebiete weiter unten), kann auch die Integration von flexiblen Membranen sinnvoll sein, wie dies im Folgenden erläutert wird.

**[0108]** Fig. 9a zeigt eine schematische Querschnittsansicht eines Ausführungsbeispiels des MEMS 100, während Fig. 9b eine schematische Draufsicht des in Fig. 9a gezeigten MEMS 100 zeigt, wobei in Fig. 9b auf die Darstellung der piezoelektrischen Aktuatoren 106\_1 und 106\_2 und der Verbindungselemente 108\_1 und 108\_2 verzichtet wurde.

**[0109]** Wie in Fig. 9a und Fig. 9b zu erkennen ist, kann die Membran 102 einen starren Bereich 150 und einen flexiblen Bereich 152 aufweisen, wobei die Hubstruktur 104 mit dem starren Bereich 150 der Membran gekoppelt sein kann. Der starre Bereich der Membran 102 kann beispielsweise durch den erweiterten Hubkörper 150 (vgl. Fig. 8) implementiert werden. Die Membran 102 kann in einer Einspannung 118, z. B. ein Rahmen, eingespannt sein.

**[0110]** Fig. 9a und Fig. 9b veranschaulicht dabei beispielhaft einen möglichen Aufbau, bei dem Ober- und Unterseite des MEMS 100 mittels einer Membran 102 (abdichtende Membran) vollständig voneinander getrennt sind, sodass das verdrängte Fluid nicht durch Umfließen des Hubkörpers 104 auf die jeweils andere Seite gelangen kann. In der Akustik ist diese Trennung erforderlich um einen akustischen Kurzschluss zu verhindern. Auch bei Mikroventilen und Mikropumpen ist eine fluidische Trennung von Vorder- und Rückseite notwendig.

**[0111]** Fig. 10a zeigt eine schematische Querschnittsansicht eines Ausführungsbeispiels des MEMS 100, während Fig. 10b eine schematische Draufsicht des in Fig. 10a gezeigten MEMS 100 zeigt, wobei in Fig. 10b auf die Darstellung der piezoelektrischen Aktuatoren 106\_1 und 106\_2 und der Verbindungselemente 108\_1 und 108\_2 verzichtet wurde.

**[0112]** Gemäß Fig. 10a und Fig. 10b kann die Membran 102 (abdichtende Membran), die beispielsweise durch einen durchgehenden flexiblen Bereich 152 gebildet ist, auch den gesamten aktiven Bereich 130, welcher von einem starren Rahmen 118 umgeben ist, überspannen, sodass auf einen erweiterten Hubkörper 150 verzichtet werden kann. Unabhängig davon lassen sich die elastischen Membranen entweder durch hybride Integration oder Spin-On-Prozesse (Rotationsbeschichtungsprozess) bzw. Sprühprozesse auf Waferenebene realisieren. Je nach Anwendungszweck kann die Membran 102 entweder gespannt oder locker mit wellenförmigem oder gefaltetem Profil ausgeführt sein. Letztere Variante eignet sich insbesondere für Anwendungen, bei denen die Auslenkung des Hubkörpers 104 möglichst wenig durch die Membran 102 beeinträchtigt werden soll.

**[0113]** Fig. 11a zeigt eine schematische Querschnittsansicht eines Ausführungsbeispiels des MEMS 100, während Fig. 11b eine schematische Draufsicht des in Fig. 11a gezeigten MEMS 100 zeigt, wobei in Fig. 11b auf die Darstellung der piezoelektrischen Aktuatoren 106\_1 und 106\_2 und der Verbindungselemente 108\_1 und 108\_2 verzichtet wurde.

**[0114]** Im Gegensatz zu Fig. 10a und Fig. 10b veranschaulicht Fig. 11a und Fig. 11b ein Beispiel, bei dem die Membran 102 oberhalb der Aktuatoren 106\_1 und 106\_2 angeordnet ist. Um einen mechanischen Kontakt mit den Verbindungselementen 108\_1 und 108\_2 und Aktuatorelementen 106\_1 und 106\_2 zu vermeiden, ist die Membran 102 mittels Abstandhaltern 160 von der Aktuatorebene beabstandet. Die Aktuatorebene ist dabei die Ebene, die in der die piezoelektrischen Aktuatoren 106\_1 und 106\_2 in einer Ruheposition, d. h. nicht ausgelenkten Position, angeordnet sind bzw. die die piezoelektrischen Aktuatoren 106\_1 bis 106\_2 in der Ruheposition aufspannen.

**[0115]** Wie in den Fig. 9a bis Fig. 11b schematisch (nicht Maßstabsgetreu) angedeutet ist, kann ein Hebelarm zwischen einem der Kraftangriffspunkte der H-förmigen Hubstruktur 104 auf die Membran 102 und einem nächstliegenden Aufnahmepunkt einer Membranaufhängung 118 (z. B. Rahmen) höchstens halb so groß (d. h. mindestens um einen Faktor 2 (oder z. B. 3, 4 oder 5) kleiner) sein wie ein Hebelarm (z. B. kürzester Abstand zwischen Einspannung 118 und einem der Kontaktpunkte 112\_1 bis 112\_m des jeweiligen piezoelektrischen Aktuators) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren 106\_1 und 106\_2.

**[0116]** Zur Veranschaulichung der obigen verallgemeinerten Darstellungen, werden nachfolgend einige konkrete Ausführungsbeispiele vorgestellt. Es handelt sich um Designs auf Basis von Aktuatoren aus piezoelektrischem PZT (Blei-Zirkonat-Titanat), entsprechenden Metall-Elektroden sowie Silizium als passivem Material. Die Designs wurden für MEMS-Lautsprecher konzipiert und mittels FEM-Simulationen optimiert.

[0117] **Fig. 12a** zeigt eine Draufsicht eines CAD-Modells eines MEMS **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, während **Fig. 12b** eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation einer Auslenkung des in **Fig. 12a** gezeigten CAD-Modells des MEMS **100** zeigt.

[0118] Das in **Fig. 12a** gezeigte CAD-Modell des MEMS **100** basiert auf einer Kombination der in den **Fig. 4a**, **Fig. 4d**, **Fig. 5b**, **Fig. 5e**, **Fig. 6c**, **Fig. 6d** und **Fig. 6f** gezeigten Ausführungsbeispiele.

[0119] Wie in **Fig. 12a** zu erkennen ist, weist das MEMS **100** eine H-förmige Hubstruktur **104** und vier piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) auf. Im Detail, weist die Hubstruktur **104** drei Abschnitte **104a** bis **104c** auf, die angeordnet sind, um eine H-förmige Hubstruktur **104** zu bilden, so dass die Hubstruktur **104** in einer Schnittebene, die senkrecht zu der Richtung **114** (siehe **Fig. 1a**) der Hubbewegung der Hubstruktur **104** verläuft, H-förmig ist.

[0120] Ein erster piezoelektrischer Aktuator **106\_1** der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) ist außerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** entlang eines ersten Abschnitts **104a** der drei Abschnitte **104a** bis **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet, wobei ein zweiter piezoelektrischer Aktuator **106\_2** der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) außerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** entlang eines zweiten Abschnitts **104b** der drei Abschnitte **104a** bis **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet ist, wobei der erste Abschnitt **104a** und der zweite Abschnitt **104b** der Hubstruktur **104** parallel zueinander verlaufen.

[0121] Der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** erstreckt sich über zumindest den gesamten ersten Abschnitt **104a** der Hubstruktur **104**, und ist über zumindest zwei (gemäß **Fig. 12a** über vier) voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_4** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 12$ ) mit zumindest zwei der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte des ersten Abschnitts **104a** der Hubstruktur **104** verbunden, wobei sich der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** über zumindest den gesamten zweiten Abschnitt **104b** der Hubstruktur **104** erstreckt und über zumindest zwei (gemäß **Fig. 12a** über vier) voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_5** bis **108\_8** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** mit zumindest zwei der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte des zweiten Abschnitts **104b** der Hubstruktur **104** verbunden ist.

[0122] Ein dritter piezoelektrischer Aktuator **106\_3** der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) ist zumindest teilweise innerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** entlang einer ersten Seite eines dritten Abschnitts **104c** der drei Abschnitte **104a** bis **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet, wobei ein vierter piezoelektrischer Aktuator **106\_4** der vier piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 4$ ) innerhalb der H-förmigen Hubstruktur **104** entlang einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite des dritten Abschnitts **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet ist, wobei der dritte Abschnitt **104c** senkrecht zu dem ersten Abschnitt **104a** und dem zweiten Abschnitt **104b** verläuft.

[0123] Der dritte piezoelektrische Aktuator **106\_3** ist über zumindest zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_9** und **108\_10** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 12$ ) mit der Hubstruktur **104** (hier über ein Verbindungselement **108\_9** mit dem ersten Abschnitt **104a** der Hubstruktur **104** und über ein Verbindungselement **108\_10** mit dem zweiten Abschnitt **104b** der Hubstruktur **104**) verbunden, wobei der vierte piezoelektrische Aktuator **106\_4** über zumindest zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_11** und **108\_12** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 12$ ) mit der Hubstruktur **104** (hier über ein Verbindungselement **108\_11** mit dem ersten Abschnitt **104a** der Hubstruktur **104** und über ein Verbindungselement **108\_12** mit dem zweiten Abschnitt **104b** der Hubstruktur **104**) verbunden ist.

[0124] **Fig. 12a** und **Fig. 12b** zeigen somit ein Design auf Basis von zwei äußeren Aktuatoren **106\_1** und **106\_2** und zwei inneren Aktuatoren **106\_3** und **106\_4**, welche jeweils paarweise gegenübereinander bzw. gegenüberliegend angeordnet sind. Zur Erzielung hoher Kräfte und Auslenkungen weisen die Aktuatoren **106\_1** bis **106\_4** eine möglichst hohe Breite auf, wodurch im aktuierten Zustand o. g. Querverwölbung deutlich in Erscheinung tritt (siehe **Fig. 12b**). An den freien Aktuatorecken, den Punkten mit der höchsten Auslenkung, sind die Aktuatoren über flächeneffiziente Federn (vgl. **Abb. 3.5d** und **Abb. 3.5f**) mit dem Hubkörper **104** verbunden, an dessen Enden über lokale Verbreiterungen zusätzliche Montageflächen realisiert sind. Aufgrund des hohen Breite-zu-Länge-Verhältnis verfügen die beiden äußeren Aktuatoren **106\_1** und **106\_2** über ein zusätzliches Verbindungselement, mit dessen Hilfe sich die generierten Kräfte ohne große Einbußen bei der Auslenkung nochmals deutlich erhöhen lassen.

**[0125]** Fig. 13a zeigt eine Draufsicht eines CAD-Modells eines MEMS **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, während Fig. 13b eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation einer Auslenkung des in Fig. 13a gezeigten CAD-Modells des MEMS **100** zeigt.

**[0126]** Das in Fig. 13a gezeigte CAD-Modell des MEMS **100** basiert auf einer Kombination der in den Fig. 4a, Fig. 4d, Fig. 5e und Fig. 6f gezeigten Ausführungsbeispiele.

**[0127]** Im Gegensatz zu Fig. 12a weist das in Fig. 13a gezeigte CAD-Modell des MEMS **100** (nur) zwei piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** und **106\_n** ( $n = 2$ ) auf, wobei ein erster piezoelektrische Aktuator **106\_1** der zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** und **106\_2** über zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_1** und **108\_2** mit dem ersten Abschnitt **104a** der Hubstruktur verbunden ist, und wobei der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** der zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** und **106\_2** über zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_3** und **108\_4** mit dem zweiten Abschnitt **104b** der Hubstruktur **104** verbunden ist.

**[0128]** Fig. 13a und Fig. 13b veranschaulicht somit eine verkleinerte Version von Fig. 12a und Fig. 12b, bei der auf die zwei mittleren Aktuatoren **106\_3** und **106\_4** verzichtet wurde, da die minimale Aktuatorlänge die verfügbare Länge überstiegen hätte. Aufgrund der deutlich schmalere äußeren Aktuatoren **106\_1** und **106\_2** weisen die zwei seitlichen Aktuatoren **106\_1** und **106\_2** nur jeweils zwei Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_4** auf, wobei es sich erneut um eine platzsparende Kombination aus Biege- und Torsionsfeder handelt.

**[0129]** Fig. 14a zeigt eine Draufsicht eines CAD-Modells eines MEMS **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, während Fig. 14b eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation einer Auslenkung des in Fig. 14a gezeigten CAD-Modells des MEMS **100** zeigt.

**[0130]** Wie in Fig. 14a zu erkennen ist, weist das MEMS **100** eine H-förmige Hubstruktur **104** und acht piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) auf. Im Detail, weist die Hubstruktur **104** drei Abschnitte **104a** bis **104c** auf, die angeordnet sind, um eine H-förmige Hubstruktur **104** zu bilden, so dass die Hubstruktur **104** in einer Schnittebene, die senkrecht zu der Richtung **114** der Hubbewegung der Hubstruktur **104** verläuft, H-förmig ist.

**[0131]** Ein erster piezoelektrische Aktuator **106\_1** und ein fünfter piezoelektrischer Aktuator **106\_5** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) sind außerhalb der Hubstruktur **104** entlang des ersten Abschnitts **104a** der Hubstruktur **104** angeordnet, wobei ein zweiter piezoelektrischer Aktuator **106\_2** und ein sechster piezoelektrischer Aktuator **106\_6** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_8** außerhalb der Hubstruktur **104** entlang des zweiten Abschnitts **104b** der Hubstruktur **104** angeordnet sind.

**[0132]** Der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** und der fünfte piezoelektrische Aktuator **106\_5** sind dabei jeweils über zumindest ein Verbindungselement **108\_1** bzw. **108\_2** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 12$ ) mit zumindest einem der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte des ersten Abschnitts **104a** der Hubstruktur **104** verbunden, wobei der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** und der sechste piezoelektrische Aktuator **106\_6** jeweils über zumindest eine Verbindungselement **108\_3** bzw. **108\_4** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 12$ ) mit zumindest einem der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte des zweiten Abschnitts **104b** der Hubstruktur **104** verbunden ist.

**[0133]** Wie in Fig. 14a zu erkennen ist, ist der erste Abschnitt **104a** in einen ersten Teilabschnitt **104a\_1** und einen zweiten Teilabschnitt **104a\_2** unterteilt, wobei der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** entlang des ersten Teilabschnitts **104a\_1** des ersten Abschnitts **104a** angeordnet ist und mit dem ersten Teilabschnitt **104a\_1** des ersten Abschnitts **104a** über das Verbindungselement **108\_1** verbunden ist, wobei der fünfte piezoelektrische Aktuator **106\_5** entlang des zweiten Teilabschnitts **104a\_2** des ersten Abschnitts **104a** angeordnet ist und mit dem zweiten Teilabschnitt **104a\_2** des ersten Abschnitts **104a** über das Verbindungselement **108\_2** verbunden ist.

**[0134]** Ferner ist der zweite Abschnitt **104b** in einen ersten Teilabschnitt **104b\_1** und einen zweiten Teilabschnitt **104b\_2** unterteilt, wobei der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** entlang des ersten Teilabschnitts **104b\_1** des zweiten Abschnitts **104b** angeordnet ist und mit dem ersten Teilabschnitt **104b\_1** des zweiten Abschnitts **104b** über das Verbindungselement **108\_3** verbunden ist, wobei der sechste piezoelektrische Aktuator **106\_6** entlang des zweiten Teilabschnitts **104b\_2** des zweiten Abschnitts **104b** angeordnet ist und mit dem zweiten Teilabschnitt **104b\_2** des zweiten Abschnitts **104b** über das Verbindungselement **108\_4** verbunden ist.

**[0135]** Ein dritter piezoelektrische Aktuator **106\_3** und ein siebter piezoelektrischer Aktuator **106\_7** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) ist zumindest teilweise innerhalb der Hubstruktur **104** entlang der ersten Seite des dritten Abschnitts **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet, wobei ein vierter piezoelektrischer Aktuator **106\_4** und ein achter piezoelektrischer Aktuator **106\_8** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_8** zumindest teilweise innerhalb der Hubstruktur **104** entlang der zweiten Seite des dritten Abschnitts **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet sind.

**[0136]** Wie in **Fig. 14a** zu erkennen ist, ist der dritte Abschnitt **104c** in einen ersten Teilabschnitt **104c\_1** und einen zweiten Teilabschnitt **104c\_2** unterteilt, wobei der dritte piezoelektrische Aktuator **106\_3** entlang einer ersten Seite des ersten Teilabschnitts **104c\_1** des dritten Abschnitts **104c** angeordnet ist, wobei der vierte piezoelektrische Aktuator **106\_4** entlang einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite des ersten Teilabschnitts **104c\_1** des dritten Abschnitts **104c** angeordnet ist, wobei der siebte piezoelektrische Aktuator **106\_7** entlang einer ersten Seite des zweiten Teilabschnitts **104c\_2** des dritten Abschnitts **104c** angeordnet ist, wobei der achte piezoelektrische Aktuator **106\_8** entlang einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite des zweiten Teilabschnitts **104c\_2** des dritten Abschnitts **104c** angeordnet ist.

**[0137]** Der dritte piezoelektrische Aktuator **106\_3** und der vierte piezoelektrische Aktuator **106\_4** sind dabei jeweils über zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_5** bis **108\_8** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente mit der jeweiligen Seite des ersten Teilabschnitts **104c\_1** des dritten Abschnitts **104c** verbunden, wobei der siebte piezoelektrische Aktuator **106\_7** und der achte piezoelektrische Aktuator **106\_8** über jeweils zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_9** bis **108\_12** mit der jeweiligen Seite des zweiten Teilabschnitts **104c\_2** des dritten Abschnitts **104c** verbunden sind.

**[0138]** Die Hubstruktur **104** kann ferner einen vierten Abschnitt **104d** aufweisen, der mittig parallel zwischen dem ersten Abschnitt **104a** und dem zweiten Abschnitt **104b** angeordnet ist, wobei auch der vierte Abschnitt **104d** in einen ersten Teilabschnitt **104d\_1** und einen zweiten Teilabschnitt **104d\_2** unterteilt sein kann.

**[0139]** **Fig. 14a** und **Fig. 14b** veranschaulicht somit ein Beispiel mit acht parallel zueinander angeordneten Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ), wobei die äußeren vier Aktuatoren entgegengesetzt ausgerichtet sind, sodass sie über Torsionsfedern möglichst weit außerhalb des Hubkörper-Schwerpunkts ihre Kraft übertragen (Verschiebung von parasitären Kippmoden im Frequenzbereich). Im Gegensatz zu den vorherigen Beispielen weist der zentrale Balken **104c** des Hubkörpers **104** lokale Verbreiterungen sowie ein Loch **180** im Zentrum auf. Hierdurch werden die Angriffspunkte, an denen die inneren Aktuatoren über Biegefedern mit dem Hubkörper verbunden sind, bei möglichst geringem Massenzuwachs vom Schwerpunkt nach außen hin verlagert um parasitären Moden entgegenzuwirken. Die zusätzlichen vertikalen Ausleger **104d\_1** und **104\_d2** sowie die lokalen Verbreiterungen **182** an den vertikalen Hubkörper-Balken **104a**, **104b**, **104c** dienen als Klebeflächen für die hybride Integration eines erweiterten Hubkörpers mit erhöhter Fläche. Aufgrund der vergleichsweise schmalen Aktuatorelemente sind Auslenkung und Kräfte geringer als im Beispiel von **Fig. 12a**. Im Gegenzug weist der Hubkörper **104** eine deutlich größere Spannweite und dichter beieinander liegende Klebeflächen auf, sodass die Anordnung das hybride Aufbringen besonders leichter und mechanisch weniger steifer Platten oder Membranen **102** ermöglicht.

**[0140]** **Fig. 15a** zeigt eine Draufsicht eines CAD-Modells eines MEMS **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, während **Fig. 15b** eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation einer Auslenkung des in **Fig. 15a** gezeigten CAD-Modells des MEMS **100** zeigt.

**[0141]** Das in **Fig. 15a** gezeigte CAD-Modell des MEMS **100** basiert auf einer Kombination der in den **Fig. 4a**, **Fig. 4d**, **Fig. 5c**, **Abb. 5g** und **Abb. 6b** gezeigten Ausführungsbeispiele.

**[0142]** Das MEMS **100** weist eine H-förmige Hubstruktur **104** und acht piezoelektrische Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) auf. Im Detail, weist die Hubstruktur **104** drei Abschnitte **104a** bis **104c** auf, die angeordnet sind, um eine H-förmige Hubstruktur **104** zu bilden, so dass die Hubstruktur **104** in einer Schnittebene, die senkrecht zu der Richtung **114** der Hubbewegung der Hubstruktur **104** verläuft, H-förmig ist.

**[0143]** Ein erster piezoelektrische Aktuator **106\_1** und ein fünfter piezoelektrischer Aktuator **106\_5** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) sind außerhalb der Hubstruktur **104** entlang des ersten Abschnitts **104a** der Hubstruktur **104** angeordnet, wobei ein zweiter piezoelektrischer Aktuator **106\_2** und ein sechster piezoelektrischer Aktuator **106\_6** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) außerhalb der Hubstruktur **104** entlang des zweiten Abschnitts **104b** der Hubstruktur **104** angeordnet sind.

**[0144]** Der erste piezoelektrische Aktuator **106\_1** und der fünfte piezoelektrische Aktuator **106\_5** sind dabei jeweils über zumindest ein Verbindungselement **108\_1** und **108\_2** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 12$ ) mit zumindest einem der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte des ersten Abschnitts **104a** der Hubstruktur **104** verbunden, wobei der zweite piezoelektrische Aktuator **106\_2** und der sechste piezoelektrische Aktuator **106\_6** jeweils über zumindest ein Verbindungselement **108\_3** und **108\_4** der voneinander beabstandeten Verbindungselemente **108\_1** bis **108\_m** ( $m = 12$ ) mit zumindest einem der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte des zweiten Abschnitts **104b** der Hubstruktur **104** verbunden ist.

**[0145]** Ein dritter piezoelektrische Aktuator **106\_3** und ein siebter piezoelektrischer Aktuator **106\_7** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) ist zumindest teilweise innerhalb der Hubstruktur **104** entlang der ersten Seite des dritten Abschnitts **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet, wobei ein vierter piezoelektrische Aktuator **106\_4** und ein achter piezoelektrische Aktuator **106\_8** der acht piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** ( $n = 8$ ) zumindest teilweise innerhalb der Hubstruktur **104** entlang der zweiten Seite des dritten Abschnitts **104c** der Hubstruktur **104** angeordnet sind.

**[0146]** Der dritte piezoelektrische Aktuator **106\_3** und der vierte piezoelektrische Aktuator **106\_4** sind dabei jeweils über zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_5** bis **108\_8** der voneinander beabstandeten Verbindungselementen mit der Hubstruktur **104** verbunden, wobei der siebte piezoelektrische Aktuator **106\_7** und der achte piezoelektrische Aktuator **106\_8** über jeweils zwei voneinander beabstandete Verbindungselemente **108\_9** bis **108\_12** mit der Hubstruktur **104** verbunden sind.

**[0147]** Die Einspannung des dritten, vierten, siebten und achten piezoelektrischen Aktuator **106\_3**, **106\_4**, **106\_7** und **106\_8** verläuft dabei mittig parallel zwischen dem ersten und zweiten Abschnitt **104a** und **104b**.

**[0148]** Fig. 15a und Fig. 15b zeigt somit ein Design ähnlich wie in Fig. 14a und Fig. 14b, jedoch mit um  $90^\circ$  verdrehten inneren Aktuatoren **106\_3**, **106\_4**, **106\_7** und **106\_8** (vgl. Fig. 5c). Im Gegensatz zu den Biegefedern im vorherigen Beispiel sind die inneren vier Aktuatoren über jeweils zwei Torsionsfedern mit dem Hubkörper **104** verbunden.

**[0149]** Fig. 16a zeigt eine Draufsicht eines CAD-Modells eines MEMS **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung, während Fig. 16b eine perspektivische Ansicht einer FEM-Simulation einer Auslenkung des in Fig. 16a gezeigten CAD-Modells des MEMS **100** zeigt.

**[0150]** Im Gegensatz zu dem in Fig. 12a und Fig. 12b gezeigten CAD-Modell des MEMS **100** weist das in Fig. 16a und Fig. 16b gezeigte CAD-Modell des MEMS **100** zusätzlich einen erweiterten Hubkörper **150**, im Detail einen unterseitig angebrachtem plattenförmigem Hubkörper **150**, auf.

**[0151]** Fig. 15a und Fig. 15b veranschaulicht somit eine leicht modifizierte Version von Fig. 12a und Fig. 12b, bei der ein erweiterter plattenförmiger Hubkörper **150** an der Unterseite des eigentlichen Hubkörpers **104** befestigt ist. Der erweiterte Hubkörper **150** nimmt eine Fläche ein, die in etwa der aktiven Fläche (vgl. Fig. 4a bis Fig. 4f) entspricht. Natürlich kann der erweiterte Hubkörper **150** bei Ausführungsbeispielen auch größer sein als die aktive Fläche.

**[0152]** Nachfolgend werden allgemeine Eigenschaften und Randbedingungen von Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung näher erläutert.

**[0153]** In der folgenden Tabelle sind dabei typische minimale und maximale Werte wesentlicher Zielparameter tabellarisch aufgelistet:

Parameter	Typische Werte	Minimum/Maximum
Resonanzfrequenz (Hubmode)	500 Hz	10 Hz–10 kHz
Anregungsfrequenz	statisch–20 kHz	statisch–1 MHz
min. aktive Fläche	$10 \times 10 \text{ mm}^2$	$100 \times 100 \text{ }\mu\text{m}^2$ – $3 \times 3 \text{ cm}^2$
Auslenkungsamplitude	200 $\mu\text{m}$	0.1 $\mu\text{m}$ –3 mm
Piezoelektrische Kraft	20 mN	1 $\mu\text{N}$ –2 N

**[0154]** In der folgenden Tabelle sind beispielhaft verwendbare Materialien für die entsprechenden Funktionselemente tabellarisch aufgelistet:

Funktion	Materialien
Piezoelektrische Schicht	PZT, PNZT, AlN, AlScN, ZnO, BCZT, KNN
Passive Schicht	Si, poly-Si, SiN, SiNO, SiO <sub>2</sub> , AlN, Metalle
Hubkörper	Si, [piezoelektrische Schicht], [passive Schicht]
Erweiterter Hubkörper	Si, Metalle, Kunststoffe
Verbindungselemente	[passive Schicht], [piezoelektrische Schicht]
Membran	Silikone, Parylene, PDMS, PI, BCB, PMMA ...

**[0155]** Im Folgenden wird Anhand von **Fig. 17a** bis **Fig. 17c** beispielhaft ein Verfahren zur Herstellung des MEMS **100** gegeben. Im Detail veranschaulicht **Fig. 17a** bis **Fig. 17c** einen vereinfacht dargestellten Prozessablauf für eine Unimorph-Konfiguration mit PZT als piezoelektrischem Material und Silizium als passivem Material. **Fig. 17a** zeigt dabei eine schematische Querschnittsansicht eines SOI-Wafers (SOI = Silicon On Insulator, dt. Silizium auf einem Isolator) vor der Vorderseitenstrukturierung, während **Fig. 17b** eine schematische Querschnittsansicht nach der Strukturierung der vorderseitigen Schichten zeigt, und während **Fig. 17c** eine schematische Querschnittsansicht nach rückseitiger Si- und SiO<sub>2</sub>-Strukturierung zeigt.

**[0156]** Das Verfahren kann die im Folgenden aufgeführten Prozessschritte umfassen.

**[0157]** Einen Schritt des Bereitstellens eines SOI-Wafers **202** mit einem Si-Substrat **204**, einer darauf aufgebracht SiO<sub>2</sub>-Schicht **206** und einer darauf aufgebracht Si-Funktionsschicht **208**.

**[0158]** Einen Schritt des Aufbringens oder Abscheidens einer Isolationsschicht (SiO<sub>2</sub>) **210**, einer piezoelektrischen Funktionsschicht (PZT) **212** und entsprechenden Metallelektroden (Pt, Au, Mo) **214** und **216**.

**[0159]** Ein Schritt des Strukturierens der Elektroden **214** und **216**, der piezoelektrischen Funktionsschicht **212** und der Isolationsschicht **210** mittels Nass- und/oder Trockenätzen ausgehend von der ersten Oberfläche **220** mit Stopp auf der vergrabenen SiO<sub>2</sub>-Schicht **206**.

**[0160]** Einen Schritt des rückseitigen Si-Ätzens mit Stopp auf der vergrabenen SiO<sub>2</sub>-Schicht **206** mit anschließender Entfernung der freigelegten SiO<sub>2</sub>-Bereiche.

**[0161]** **Fig. 18** zeigt eine schematische Ansicht eines Systems **200**, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Das System weist das oben beschriebene MEMS **100** und eine Ansteuereinrichtung **202** auf, wobei die Ansteuereinrichtung **202** ausgebildet sein kann, um die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** des MEMS **100** anzusteuern.

**[0162]** Beispielsweise kann die Ansteuereinrichtung **202** ausgebildet sein, um ein Ansteuersignal **204** zum Ansteuern der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** bereitzustellen.

**[0163]** Ferner kann das MEMS **100** bei Ausführungsbeispielen einen Positionssensor **140**, z. B. eine piezoelektrischen oder kapazitiven Positionssensor, aufweisen, der ausgebildet ist, um ein von der Auslenkung der Membran **102** abhängiges Sensorsignal **141** bereitzustellen. Die Ansteuereinrichtung kann dabei ausgebildet sein, um die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren **106\_1** bis **106\_n** des MEMS **100** basierend auf dem Sensorsignal **141** geregelt anzusteuern.

**[0164]** Weitere Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung schaffen einen miniaturisierten Hubaktor mit einem flächenreduziertem starren Hubkörper (der z. B. weniger als 40% (oder 30% oder 20%) der aktiven Fläche einnimmt); mindestens zwei piezoelektrischen Antrieben (die z. B. mindestens 40% (oder 50%, 60%, 70% oder 80%) der aktiven Fläche einnehmen), die neben dem Hubkörper angeordnet sind und den Hubkörper aus der Ebene nach oben oder unten bewegen; mit Verbindungselementen, über die die piezoelektrischen Antriebe mit dem Hubkörper verbunden sind; und mit einer an dem Hubkörper fixierten Membran, die eine fluidische Trennung von Vorderseite und Rückseite gewährleistet. Dabei kann der miniaturisierte Hubaktor in Siliziumtechnologie hergestellt sein.

**[0165]** Bei Ausführungsbeispielen kann der miniaturisierte Hubaktuator zur Schall- oder Ultraschallerzeugung (in einem Bereich von 20 Hz bis 1 MHz, in einem Bereich von 20 Hz bis 20 kHz, in einem Bereich von 20 kHz bis 100 kHz oder in einem Bereich von 100 kHz bis 1 MHz), zur Verdrängung von Flüssigkeiten oder zur Verdrängung von Gasen verwendet werden. Ferner kann der miniaturisierte Hubaktuator auch zur Erzeugung von Tröpfchen, z. B. für Tintenstrahldrucker, verwendet werden.

**[0166]** Bei Ausführungsbeispielen kann der miniaturisierte Hubaktuator eine Hubkörpergeometrie mit einer Rahmenstruktur, Balken und/oder einer Platte aufweisen.

**[0167]** Bei Ausführungsbeispielen kann der miniaturisierte Hubaktuator einem erweiterten Hubkörper mit großer Fläche zur Erhöhung des verdrängten Fluidvolumens aufweisen.

**[0168]** Bei Ausführungsbeispielen kann der miniaturisierte Hubaktuator Sensorelemente zur Positionserfassung und -regelung aufweisen (vgl. **Fig. 7a** und **Fig. 7b**).

**[0169]** Bei Ausführungsbeispielen können mehrere miniaturisierte Hubaktuatoren im Array angeordnet werden.

**[0170]** Mit Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung lassen sich im resonanten und nichtresonanten Betrieb sehr große Kräfte bei ebenfalls hoher Auslenkung erzeugen. Die Gründe hierfür liegen in der Verwendung von (1) flächenreduzierten Hubkörpern, welche eine hohe Flächenausnutzung hinsichtlich der Aktuatoren ermöglichen, (2) flächenreduzierten Hubkörpern, welche aufgrund ihrer Geometrie eine Kraftübertragung möglichst weit entfernt vom Schwerpunkt des Hubkörpers zulassen, (3) Aktuatoranordnungen, bei denen die verfügbare aktive Fläche besonders effizient genutzt wird, (4) vorzugsweise breiten Biegeaktuatoren mit einseitiger Einspannung, welche aufgrund der ausgeprägten Querverwölbung im aktuierten Zustand hohe Kräfte generieren können, und (5) geeigneten Federelementen, welche möglichst flächeneffizient ausgeführt sind und die Übertragung hoher Kräfte erlauben ohne die Auslenkung des Hubkörpers zu stark zu behindern.

**[0171]** Darüber hinaus ergeben sich folgende Vorteile. Erstens, durch die Parallelschaltung mehrerer Aktuatoren erhöht sich die effektive Federsteifigkeit, sodass sich vergleichsweise hohe Resonanzfrequenzen bei gleichzeitig hohen Auslenkungen realisieren lassen. Zweitens, durch die Flächenreduzierung, weisen die Hubkörper eine verhältnismäßig geringe Masse auf, sodass sich vergleichsweise hohe Resonanzfrequenzen bei gleichzeitig hohen Auslenkungen realisieren lassen. Drittens, durch die Verwendung von einem leichtem Material, vorzugsweise Silizium, für den Hubkörper, lassen sich hohe Resonanzfrequenzen bei gleichzeitig hohen Auslenkungen realisieren. Viertens, durch Aufbringen von plattenförmigen oder anders geformten Gebilden lassen sich erweiterte Hubkörper realisieren, deren Fläche größer als die aktive Fläche sind. Bei der Herstellung in Siliziumtechnologie lassen sich so die Herstellungskosten reduzieren, da die Chipfläche primär durch die Aktuatoren bestimmt wird und kleiner als die notwendige Hubfläche sein kann. Fünftens, mithilfe der integrierten Sensorik lässt sich die tatsächliche Position des Hubkörpers im Betrieb kontinuierlich bestimmen. Dies bildet die Grundlage für eine geregelte Anregung (Closed-Loop), über die sich äußere Einflüsse und Alterungseffekte elektronisch kompensieren lassen. Sechstens, die Verwendung von piezoelektrischen Antrieben erlaubt eine Reduzierung des Energiebedarfs gegenüber Hubaktuatoren mit elektrodynamischem Antrieb.

**[0172]** Im Folgenden werden beispielhafte technische Anwendungsgebiete des MEMS **100** aufgeführt.

**[0173]** Die oben beschriebenen Aktuator-Strukturen eignen sich für Anwendungen, bei denen mittels piezoelektrischer Antriebe hohe Kräfte und Hübe erzeugt werden sollen. Dies trifft in erster Linie auf Anwendungsgebiete zu, bei denen Fluide verdrängt werden. Hierzu zählen MEMS-Lautsprecher, Ventile und Pumpen. MEMS-Lautsprecher (z. B. chip-basierte intelligente Mikrolautsprecher) können in mobilen Kommunikationsgeräten verwendet werden, wie z. B. in erster Linie in Mobiltelefonen, darüber hinaus aber auch in Tablets, Laptops, Kopfhörern und Hörgeräten.

## ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

### Zitierte Patentliteratur

- US 2013/0156253 A1 [0006]
- US 7003125 [0006]
- US 8280079 [0006]
- US 2013/0294636 A1 [0006]
- US 2011/0051985 A1 [0006]
- US 7089069 [0006]
- US 2010/0316242 A1 [0006]

### Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Shahosseini et al., Optimization and Microfabrication of High Performance Silicon-Based MEMS Microspeaker, IEEE Sensors journal, 13 (2013) 273–284 [0006]
- Yi et al., Performance of packaged piezoelectric microspeakers depending on the material properties, Proc. MEMS 2009, 765–768 [0006]
- Dejaeger et al., Development and Characterization of a Piezoelectrically Actuated MEMS Digital Loudspeaker, Procedia Engineering 47 (2012) 184–187 [0006]
- Glacer et al., Reversible acoustical transducers in MEMS technology, Proc. DTIP 2013 [0006]

**Patentansprüche**

1. MEMS (100), mit folgenden Merkmalen:  
einer Membran (102);  
einer Hubstruktur (104), die mit der Membran (102) gekoppelt ist; und  
zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n), die über eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen (108\_1:108\_m) mit einer Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten (110\_1:110\_m) der Hubstruktur (104) verbunden sind;  
wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) ausgebildet sind, um eine Hubbewegung der Hubstruktur (104) hervorzurufen, um die Membran (102) auszulenken.
2. MEMS (100) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen (108\_1:108\_m) mit einer Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten (112\_1:112\_m) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) verbunden sind.
3. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei jeder der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) über zumindest zwei voneinander beabstandeten Verbindungselemente (108\_1:108\_m) mit zumindest zwei voneinander beabstandeten Kontaktpunkten (110\_1:110\_m) der Hubstruktur (104) verbunden sind.
4. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) mit der Membran (102) über eine Mehrzahl von Bereichen gekoppelt ist, die entlang von zumindest zwei zumindest teilweise voneinander beabstandeten Geraden oder Kurven mit der Membran (102) angeordnet sind.
5. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) senkrecht zu einer Richtung (114) der Hubbewegung eine Fläche aufspannt, die zumindest 30% einer Fläche der Membran (102) entspricht.
6. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) mit der Membran (102) über eine Mehrzahl von verteilt angeordneten Bereichen (104a; 104b; 104c) gekoppelt ist.
7. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) in einer Schnittebene, die senkrecht zu einer Richtung (114) der Hubbewegung verläuft, eine I-, eine L-Struktur, eine H-Struktur, eine X-Struktur, eine O-Struktur oder eine kreuzförmige Struktur aufweist.
8. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein Hebelarm zwischen einem der Kraftangriffspunkte der Hubstruktur (104) auf die Membran (102) und einem nächstliegenden Aufnahmepunkt einer Membranaufhängung (118) höchstens hat so groß ist wie ein Hebelarm der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n).
9. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Querschnittsfläche der Hubstruktur (104) senkrecht zu einer Richtung (114) der Hubbewegung der Hubstruktur (104) kleiner ist als eine Summe von piezoelektrisch aktiven Aktuatorflächen der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n).
10. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) eine Mehrzahl von miteinander verbundenen Balken (104a; 104b; 104c) aufweist, die jeweils zumindest teilweise an einer Stirnseite mit der Membran (102) gekoppelt sind.
11. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) als Biegebalken ausgebildet sind.
12. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) symmetrisch ist, und wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) symmetrisch zu einem Schwerpunkt (120) der Hubstruktur (104) angeordnet sind.
13. MEMS (100) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Mehrzahl von voneinander beabstandeten Kontaktpunkten (110\_1:110\_m) der Hubstruktur (104) symmetrisch zu dem Schwerpunkt (120) der Hubstruktur (104) angeordnet sind.

14. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) in einer Ruheposition in einer Ebene angeordnet sind, und wobei die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) ausgebildet sind, um eine Hubbewegung der Hubstruktur (104) derart hervorzurufen, dass eine Richtung (114) der Hubbewegung senkrecht zu der Ebene der piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) verläuft.

15. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Mehrzahl von voneinander beabstandeten Verbindungselementen (108\_1:108\_m) Federelemente aufweisen.

16. MEMS (100) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei jedes der Federelemente (108\_1:108\_m) zumindest ein Biegefederelement (108B), zumindest ein Torsionsfederelement (108T) oder eine Kombination aus zumindest einem Biegefederelement (108B) und zumindest einem Torsionsfederelement (108T) umfasst.

17. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Membran (102) parallel zu einer ersten Oberfläche (122) und einer zweiten Oberfläche (124) des MEMS (100) verläuft, wobei die Membran (102) ausgebildet ist, um bei einer bestimmungsgemäßen Verwendung des MEMS (100) die erste Oberfläche (122) und die zweite Oberfläche (124) des MEMS (100) fluidisch oder gasförmig voneinander zu trennen.

18. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Membran (102) einen starren Bereich (150) und einen flexiblen Bereich (152) aufweist, wobei die Hubstruktur (104) mit dem starren Bereich (150) der Membran (102) gekoppelt ist.

19. MEMS (100) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei der starre Bereich (150) der Membran (102) durch eine erweiterte Hubstruktur (104) gebildet wird.

20. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das MEMS (100) zumindest einen piezoelektrischen Positionssensor (140) aufweist, der ausgebildet ist, um ein von der Auslenkung der Membran (102) abhängiges Sensorsignal bereitzustellen.

21. MEMS (100) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das MEMS (100) zumindest vier piezoelektrische Aktuatoren (106\_1:106\_n) aufweist, wobei zwei der zumindest vier piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) als piezoelektrische Positionssensoren ausgebildet sind, wobei die zumindest vier piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) derart symmetrisch zu einem Schwerpunkt angeordnet sind, dass die zwei als piezoelektrische Positionssensoren ausgebildeten piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) und die übrigen piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) jeweils symmetrisch zu dem Schwerpunkt der Hubstruktur (104) angeordnet sind.

22. MEMS (100) nach Anspruch 20, wobei das MEMS (100) zumindest einen Stapel von zwei voneinander isolierten piezoelektrischen Schichten aufweist, wobei eine der zwei Schichten (140) den zumindest einen piezoelektrischen Sensor bildet, und wobei eine andere der zwei Schichten (142) einen der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) bildet.

23. MEMS (100) nach Anspruch 22, wobei die zwei voneinander isolierten piezoelektrischen Schichten unterschiedliche Materialien aufweisen.

24. MEMS (100) nach Anspruch 20, wobei der piezoelektrische Positionssensor (140) und ein piezoelektrischer Aktuator der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) durch eine gemeinsame piezoelektrische Schicht gebildet sind.

25. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das MEMS (100) zumindest einen piezoresistiven oder einen kapazitiven Positionssensor aufweist, der ausgebildet ist, um ein von der Auslenkung der Membran (102) abhängiges Sensorsignal bereitzustellen.

26. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) Silizium aufweist.

27. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) zumindest drei Abschnitte (104a; 104b; 104c) aufweist, die angeordnet sind, um eine H-förmige Hubstruktur (104) zu bilden, so dass die Hubstruktur (104) in der Schnittebene, die senkrecht zu der Richtung (114) der Hubbewegung der Hubstruktur (104) verläuft, H-förmig ist.

28. MEMS (100) nach Anspruch 27, wobei ein erster piezoelektrischer Aktuator (106\_1) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) außerhalb der H-förmigen Hubstruktur (104) entlang eines ersten Abschnitts (104a) der drei Abschnitte (104a; 104b; 104c) der Hubstruktur (104) angeordnet ist, und wobei ein zweiter piezoelektrischer Aktuator (106\_2) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) außerhalb der H-förmigen Hubstruktur (104) entlang eines zweiten Abschnitts (104b) der drei Abschnitte (104a; 104b; 104c) der Hubstruktur (104) angeordnet ist, wobei der erste Abschnitt (104a) und der zweite Abschnitt (104b) der Hubstruktur (104) parallel zueinander verlaufen.

29. MEMS (100) nach Anspruch 28, wobei ein dritter piezoelektrischer Aktuator (106\_3) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) zumindest teilweise innerhalb der H-förmigen Hubstruktur (104) entlang einer ersten Seite eines dritten Abschnitts (104c) der drei Abschnitte (104a; 104b; 104c) der Hubstruktur (104) angeordnet ist, wobei ein vierter piezoelektrischer Aktuator (106\_4) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) zumindest teilweise innerhalb der H-förmigen Hubstruktur (104) entlang einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite des dritten Abschnitts (104c) der Hubstruktur (104) angeordnet ist, wobei der dritte Abschnitt (104c) senkrecht zu dem ersten Abschnitt (104a) und dem zweiten Abschnitt (104b) verläuft.

30. MEMS (100) nach einem der Ansprüche 28 oder 29, wobei sich der erste piezoelektrische Aktuator (106\_1) zumindest über den gesamten ersten Abschnitt (104a) der Hubstruktur (104) erstreckt und über zumindest zwei der voneinander beabstandeten Verbindungselemente (108\_1:108\_m) mit zumindest zwei der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte (110\_1:110\_m) des ersten Abschnitts (104a) der Hubstruktur (104) verbunden ist, wobei sich der zweite piezoelektrische Aktuator (106\_2) zumindest über den gesamten zweiten Abschnitt (104b) der Hubstruktur (104) erstreckt und über zumindest zwei der voneinander beabstandeten Verbindungselemente (108\_1:108\_m) mit zumindest zwei der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte (110\_1:110\_m) des zweiten Abschnitts (104b) der Hubstruktur (104) verbunden ist.

31. MEMS (100) nach einem der Ansprüche 28 oder 29, wobei der erste piezoelektrische Aktuator (106\_1) und ein fünfter piezoelektrischer Aktuator (106\_5) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) außerhalb der Hubstruktur (104) entlang des ersten Abschnitts (104a) der Hubstruktur (104) angeordnet sind, wobei der zweite piezoelektrische Aktuator (106\_2) und ein sechster piezoelektrischer Aktuator (106\_6) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) außerhalb der Hubstruktur (104) entlang des zweiten Abschnitts (104b) der Hubstruktur (104) angeordnet sind; wobei der erste piezoelektrische Aktuator (106\_1) und der fünfte piezoelektrische Aktuator (106\_5) jeweils über zumindest eines der voneinander beabstandeten Verbindungselemente (108\_1:108\_m) mit zumindest einem der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte (110\_1:110\_m) des ersten Abschnitts (104a) der Hubstruktur (104) verbunden ist, wobei der zweite piezoelektrische Aktuator (106\_2) und der sechste piezoelektrische Aktuator (106\_6) jeweils über zumindest eines der voneinander beabstandeten Verbindungselemente (108\_1:108\_m) mit zumindest einem der voneinander beabstandeten Kontaktpunkte (110\_1:110\_m) des zweiten Abschnitts (104b) der Hubstruktur (104) verbunden ist.

32. MEMS (100) nach Anspruch 31, wobei der erste Abschnitt (104a) in einen ersten Teilabschnitt (104a\_1) und einen zweiten Teilabschnitt (104\_2) unterteilt ist, wobei der erste piezoelektrische Aktuator (106\_1) entlang des ersten Teilabschnitts (104a\_1) des ersten Abschnitts (104a) angeordnet ist und mit dem ersten Teilabschnitt (104a\_1) des ersten Abschnitts (104a) über das jeweilige Verbindungselement verbunden ist, wobei der fünfte piezoelektrische Aktuator (106\_5) entlang des zweiten Teilabschnitts (104a\_2) des ersten Abschnitts (104a) angeordnet ist und mit dem zweiten Teilabschnitt (104\_2) des ersten Abschnitts (104a) über das jeweilige Verbindungselement verbunden ist; und wobei der zweite Abschnitt (104b) in einen ersten Teilabschnitt (104b\_1) und einen zweiten Teilabschnitt (104b\_2) unterteilt ist, wobei der zweite piezoelektrische Aktuator (106\_2) entlang des ersten Teilabschnitts (104b\_1) des zweiten Abschnitts (104b) angeordnet ist und mit dem ersten Teilabschnitt (104b\_1) des zweiten Abschnitts (104b) über das jeweilige Verbindungselement verbunden ist, wobei der sechste piezoelektrische Aktuator (106\_6) entlang des zweiten Teilabschnitts (104b\_2) des zweiten Abschnitts (104b) angeordnet ist und mit dem zweiten Teilabschnitt (104b\_2) des zweiten Abschnitts (104b) über das jeweilige Verbindungselement verbunden ist.

33. MEMS (100) nach einem der Ansprüche 31 oder 32, wobei der dritte piezoelektrische Aktuator (106\_3) und ein siebter piezoelektrischer Aktuator (106\_7) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) zumindest teilweise innerhalb der Hubstruktur (104) entlang der ersten Seite des dritten Abschnitts (104c) der Hubstruktur (104) angeordnet sind, wobei der vierte piezoelektrische Aktuator (106\_4) und ein achter piezoelektrischer Aktuator (106\_8) der zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n)

zumindest teilweise innerhalb der Hubstruktur (104) entlang der zweiten Seite des dritten Abschnitts (104c) der Hubstruktur (104) angeordnet sind.

34. MEMS (100) nach Anspruch 33, wobei der dritte Abschnitt (104c) in einen ersten Teilabschnitt (104c\_1) und einen zweiten Teilabschnitt (104c\_2) unterteilt ist, wobei der dritte piezoelektrische Aktuator (106\_3) entlang einer ersten Seite des ersten Teilabschnitts (104c\_1) des dritten Abschnitts (104c) angeordnet ist, wobei der vierte piezoelektrische Aktuator (106\_4) entlang einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite des ersten Teilabschnitts (104c\_1) des dritten Abschnitts (104c) angeordnet ist, wobei der siebte piezoelektrische Aktuator (106\_7) entlang einer ersten Seite des zweiten Teilabschnitts (104c\_2) des dritten Abschnitts (104c) angeordnet ist, wobei der achte piezoelektrische Aktuator (106\_8) entlang einer der ersten Seite gegenüberliegenden zweiten Seite des zweiten Teilabschnitts (104c\_2) des dritten Abschnitts (104c) angeordnet ist.

35. MEMS (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Hubstruktur (104) eine Mehrzahl von Hubkörpern aufweist.

36. MEMS (100) nach Anspruch 35, wobei zumindest zwei Hubkörper der Mehrzahl von Hubkörpern über einen erweiterten Hubkörper miteinander verbunden sind.

37. System (200), mit folgenden Merkmalen:  
einem MEMS (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 36; und  
einer Ansteuereinrichtung (202), die ausgebildet ist, um die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) des MEMS (100) des MEMS (100) anzusteuern;  
wobei das MEMS (100) zumindest einen piezoelektrischen Positionssensor (140) aufweist, der ausgebildet ist, um ein von der Auslenkung der Membran (102) abhängiges Sensorsignal (141) bereitzustellen; und  
wobei die Ansteuereinrichtung (202) ausgebildet ist, um die zumindest zwei piezoelektrischen Aktuatoren (106\_1:106\_n) des MEMS (100) basierend auf dem Sensorsignal (141) geregelt anzusteuern.

38. Verwendung des MEMS (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 36 zur Schallerzeugung, zur Ultraschallerzeugung, zur Verdrängung von Flüssigkeiten, zur Verdrängung von Gasen oder zur Erzeugung von Flüssigkeitströpfchen.

Es folgen 31 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

100

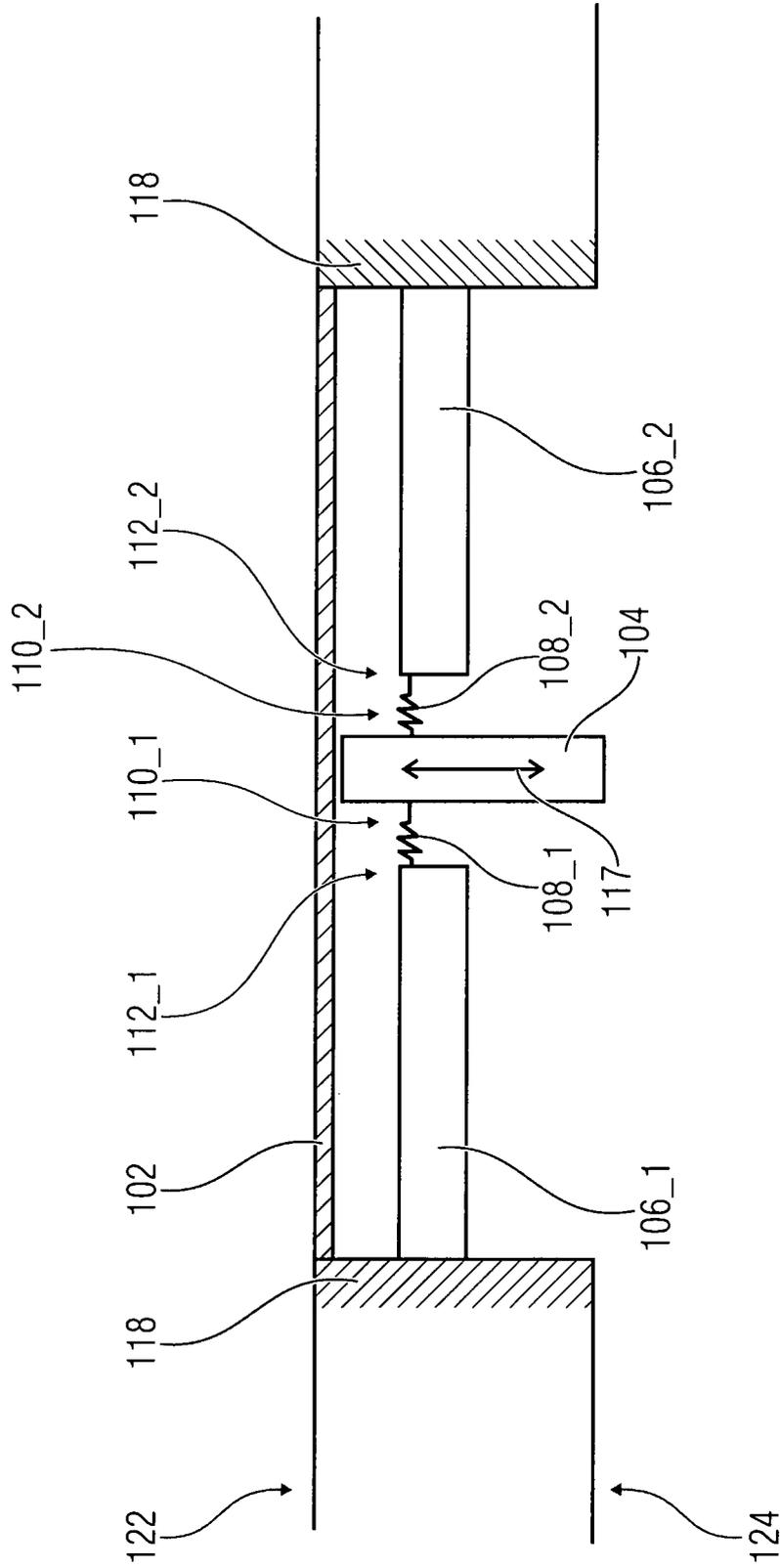


FIG 1A

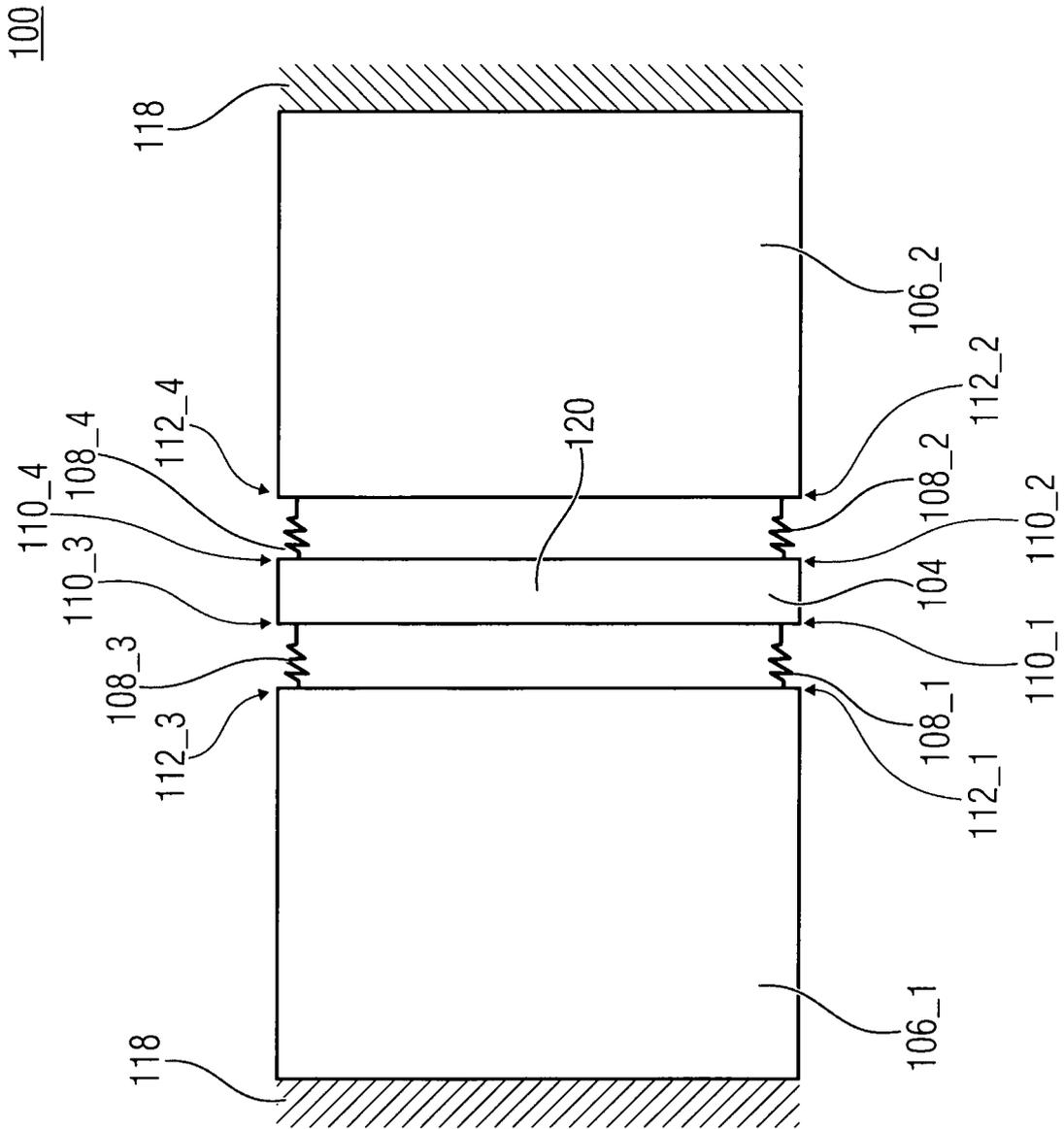


FIG 1B

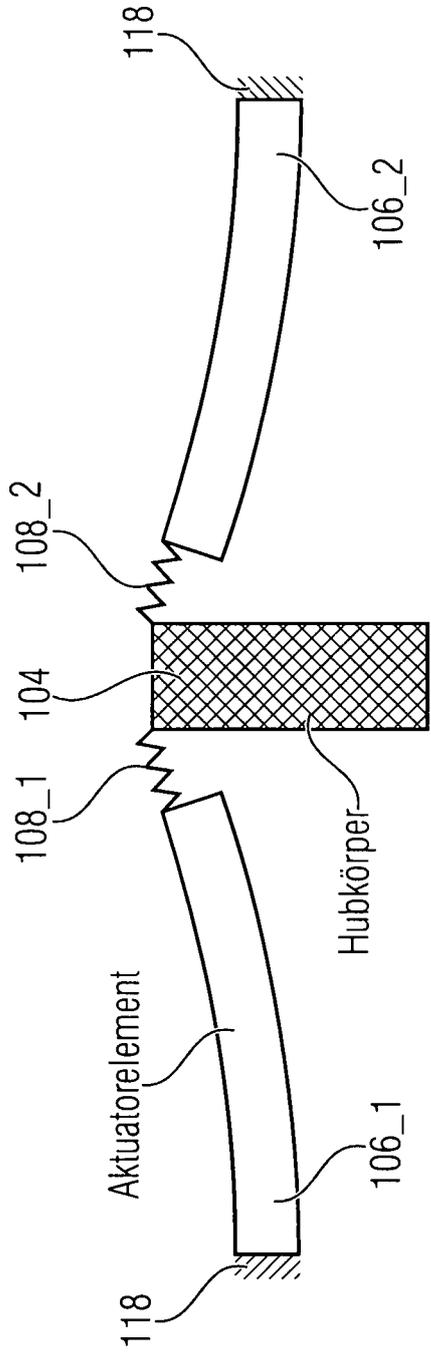


FIG 2A

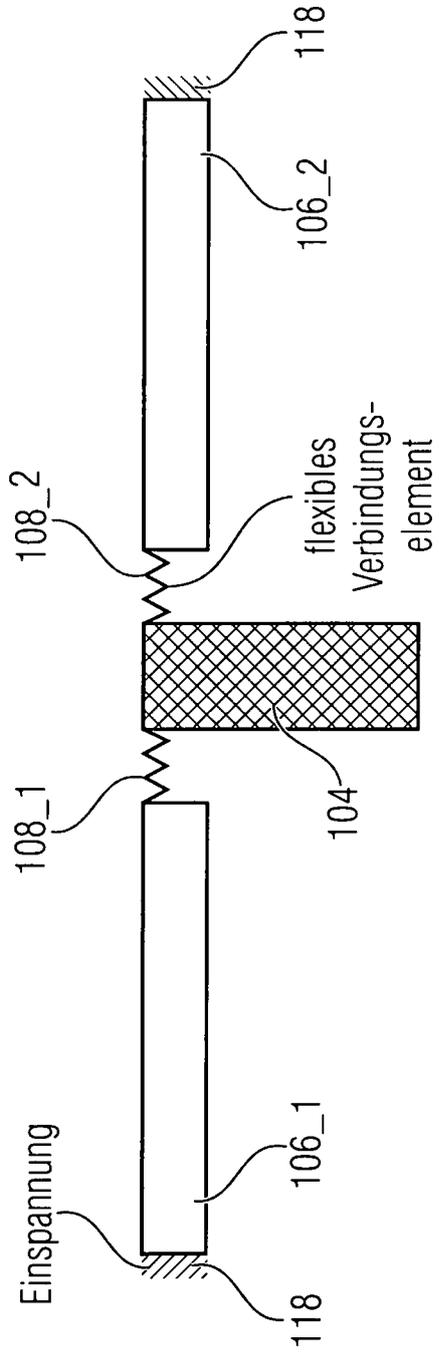


FIG 2B

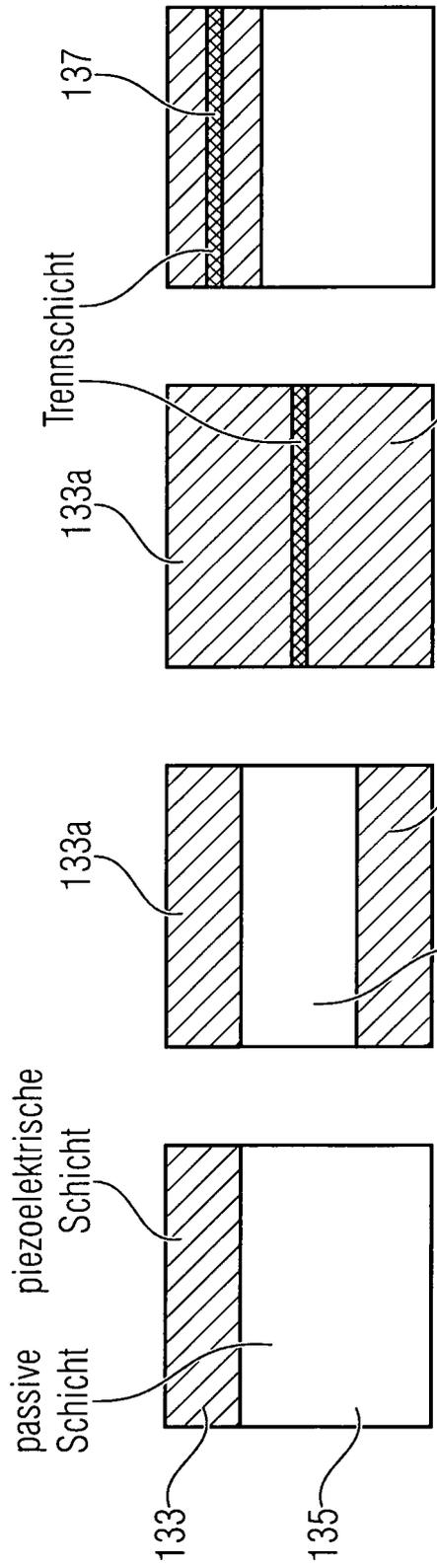


FIG 3A

FIG 3B

FIG 3C

FIG 3D

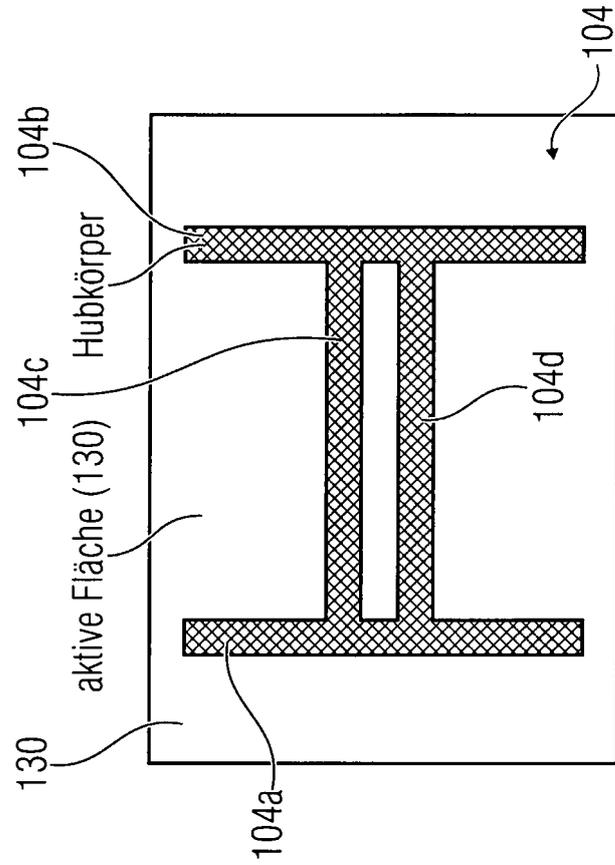


FIG 4B

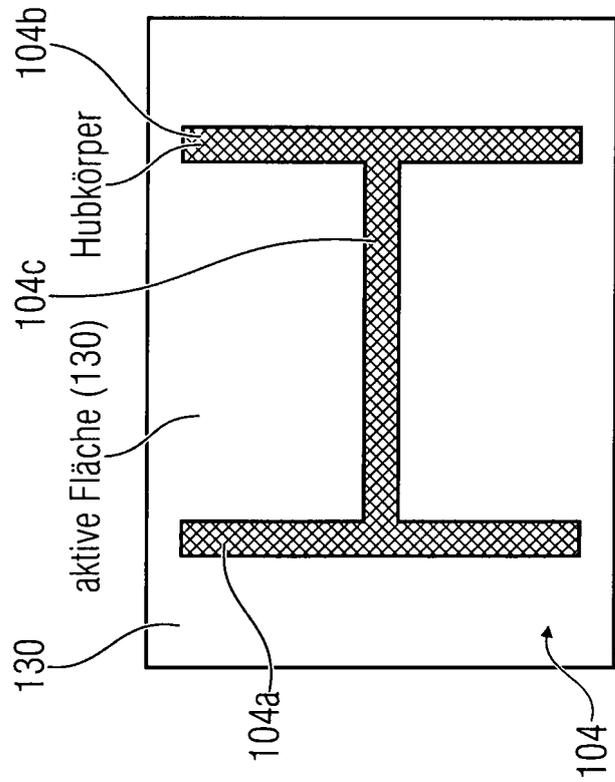


FIG 4A

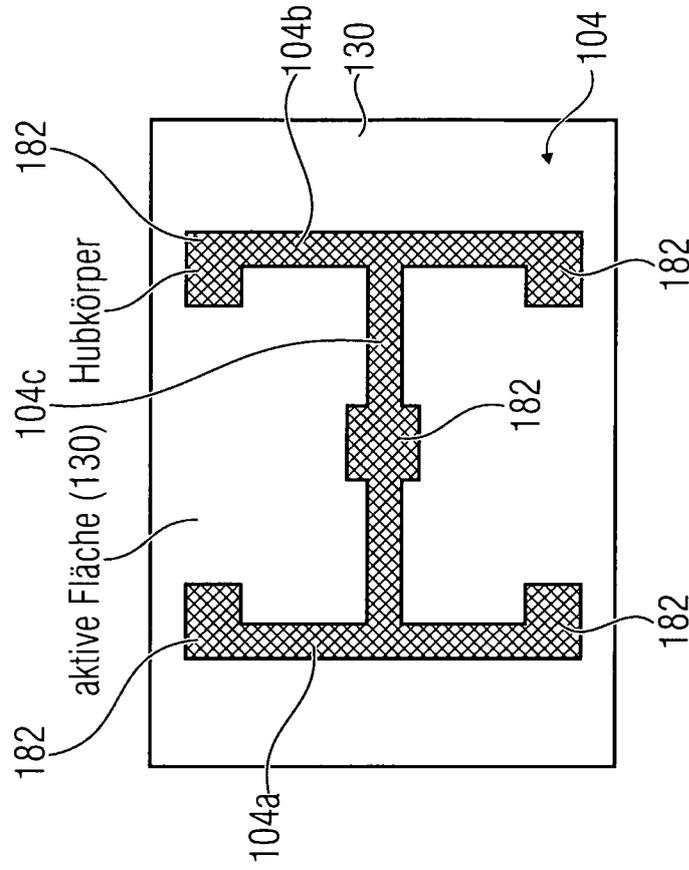


FIG 4C

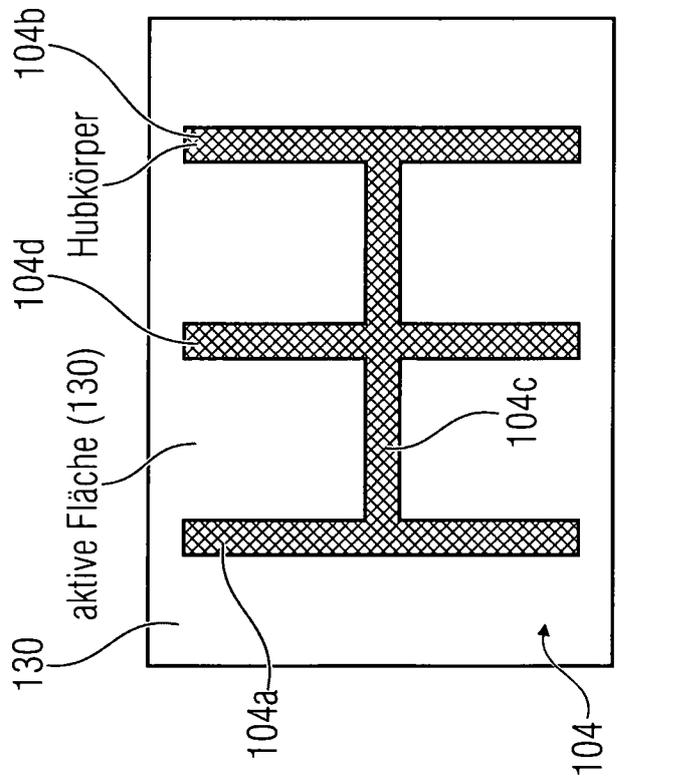


FIG 4D

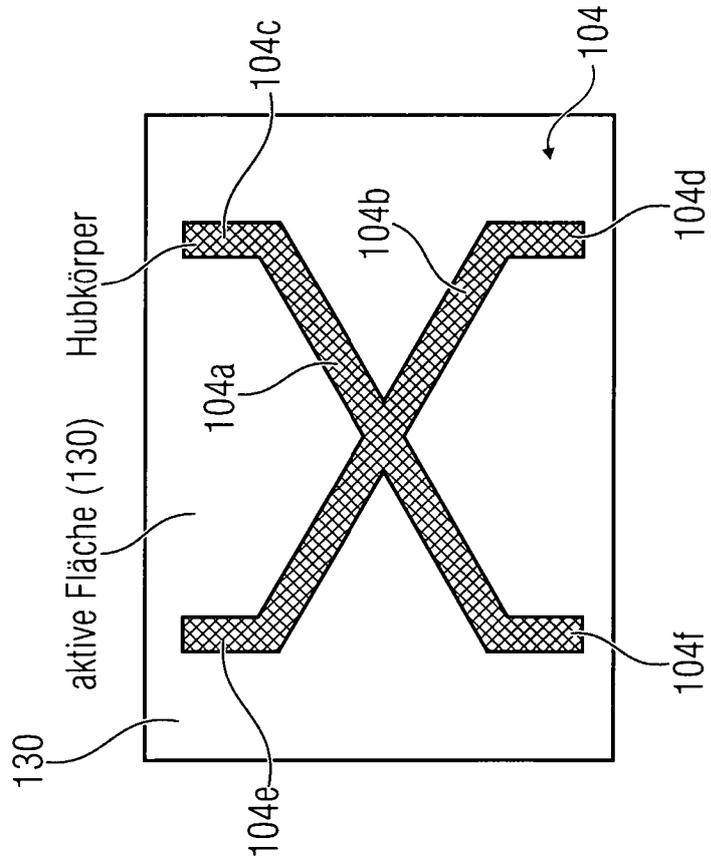


FIG 4F

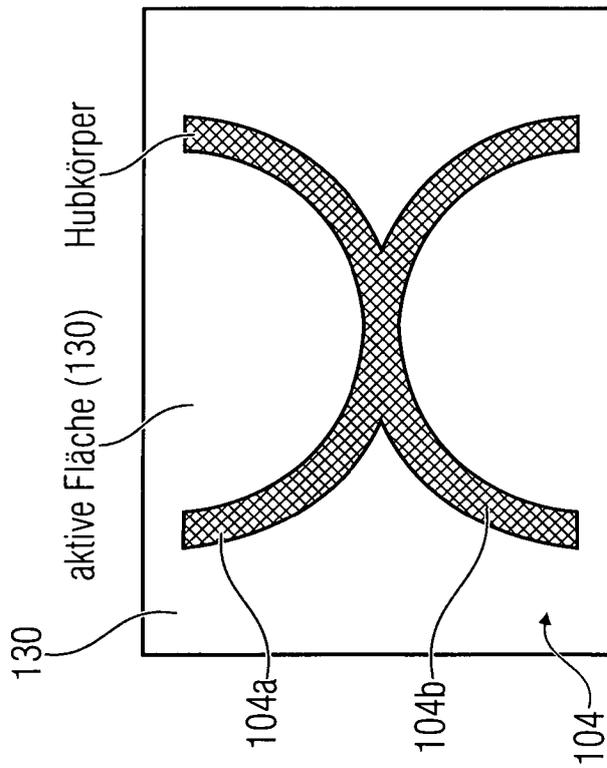


FIG 4E

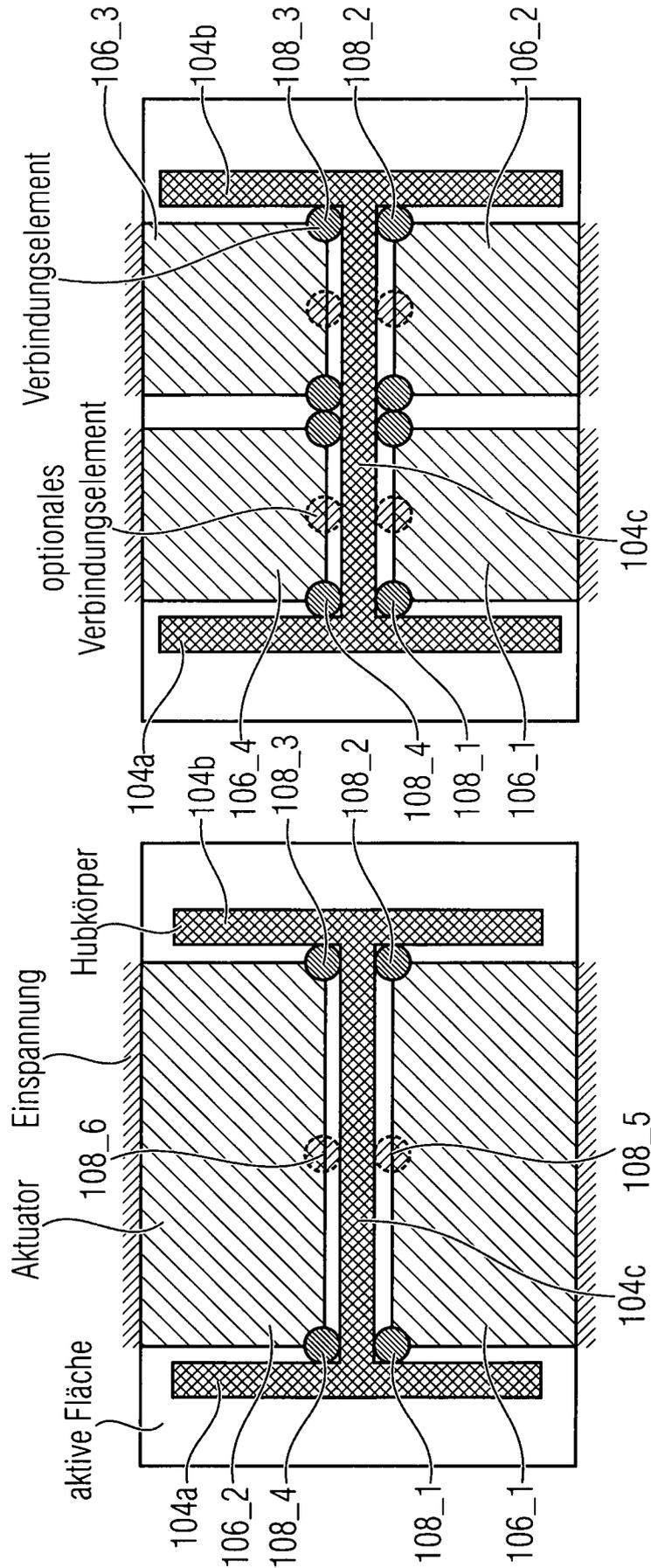


FIG 5B

FIG 5A

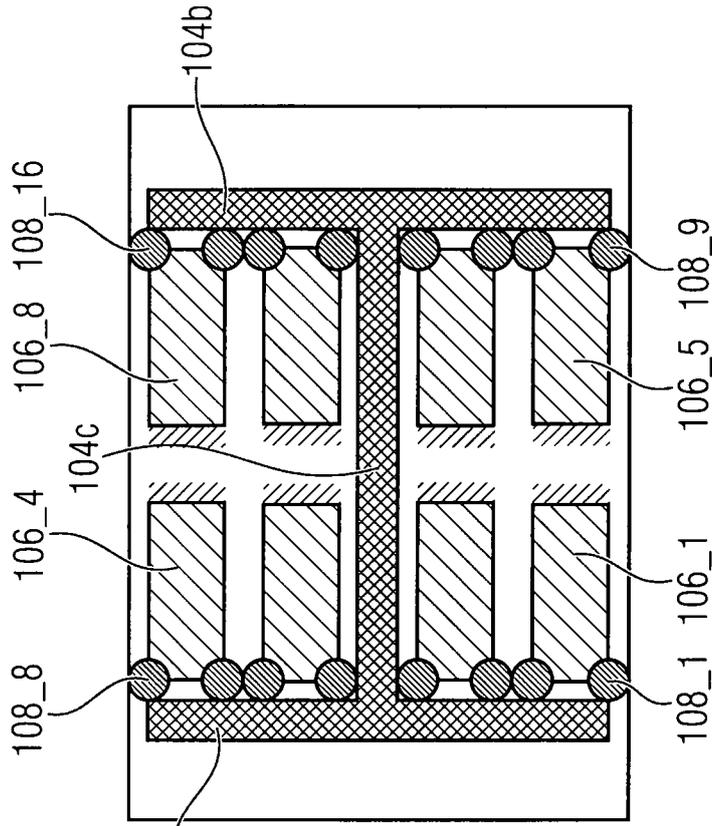


FIG 5D

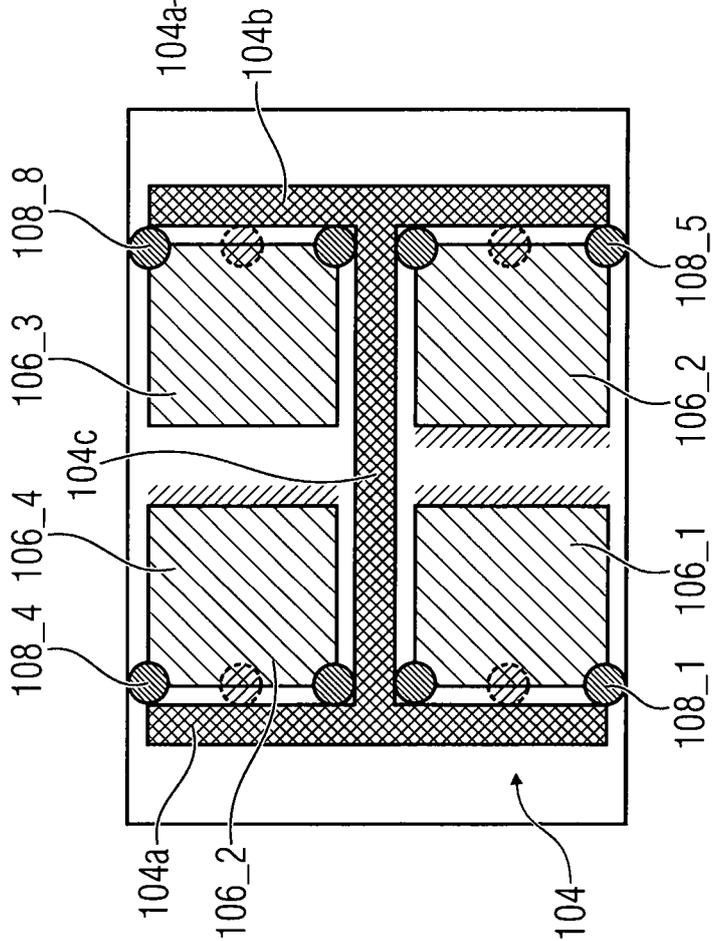


FIG 5C

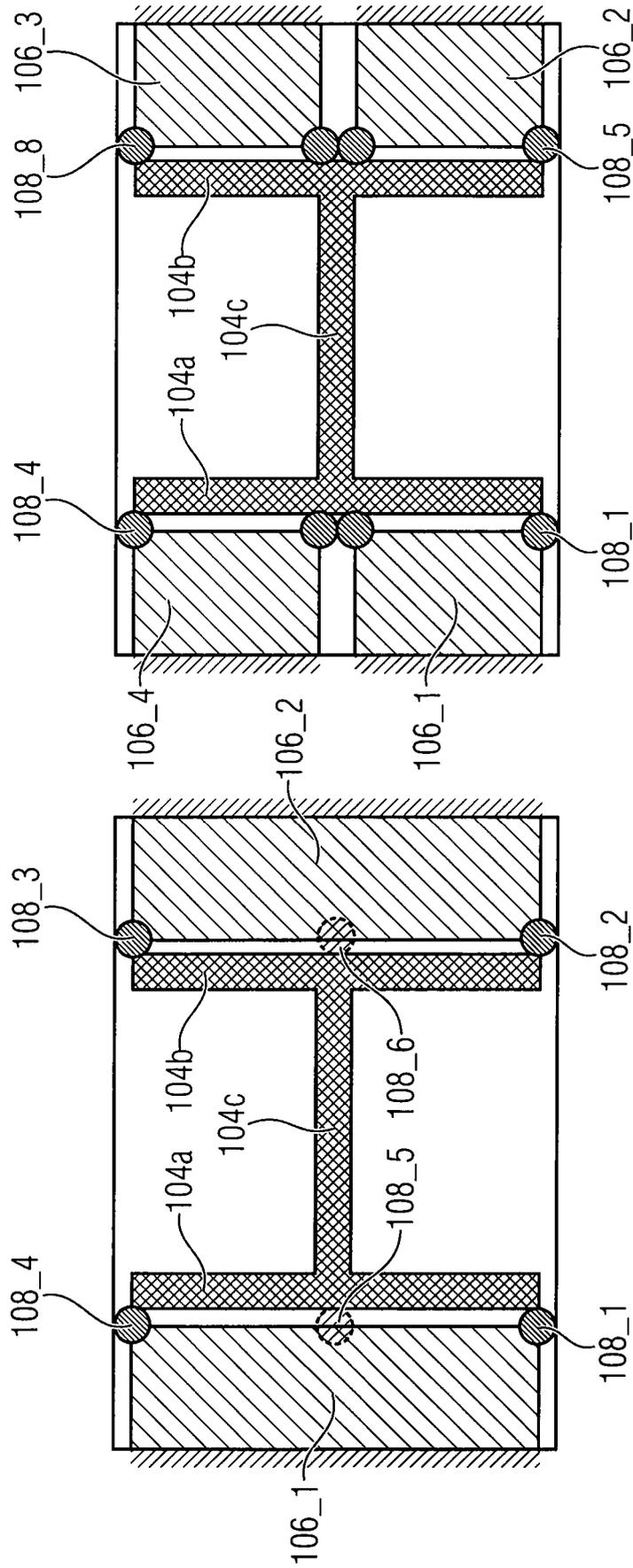


FIG 5F

FIG 5E

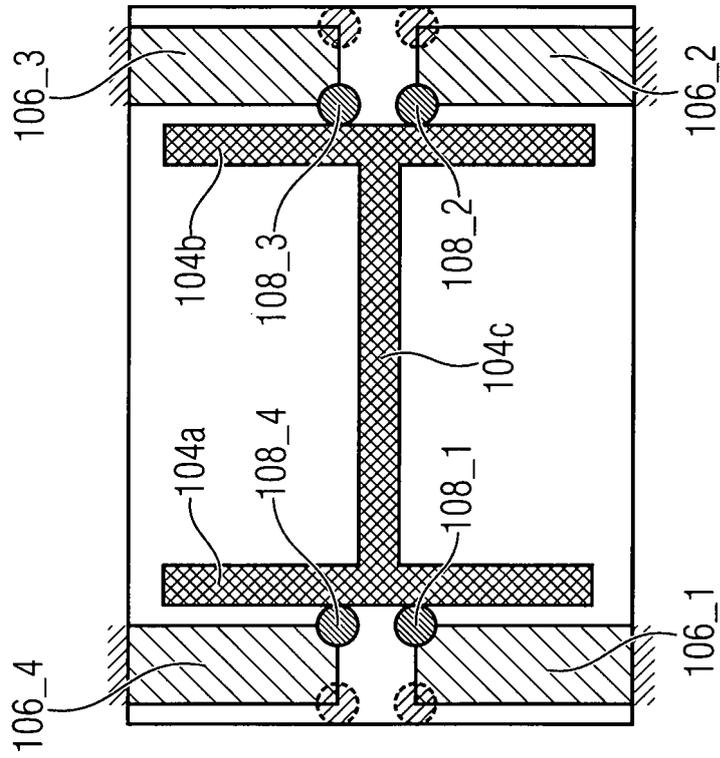


FIG 5H

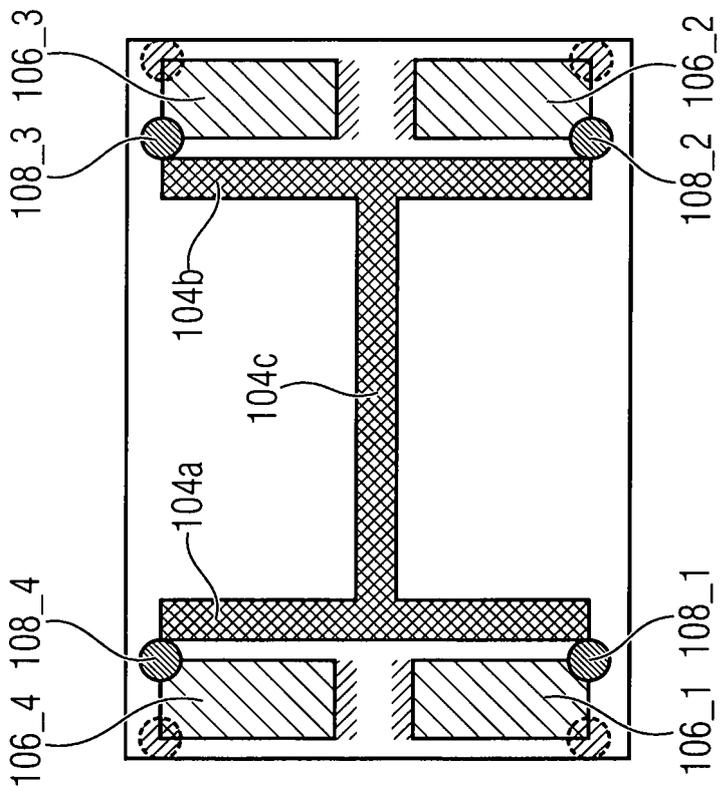


FIG 5G

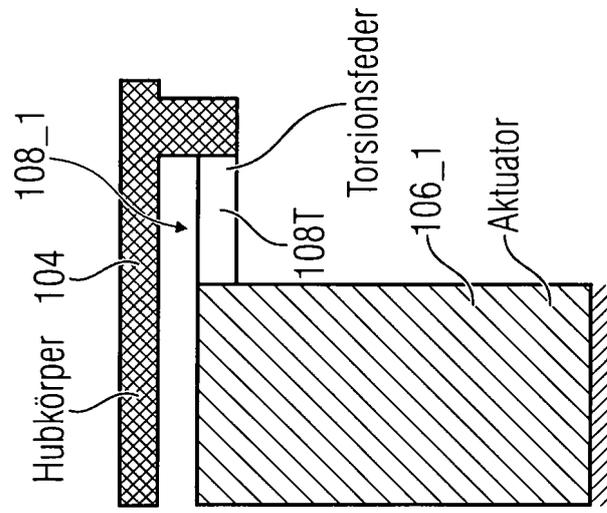


FIG 6B

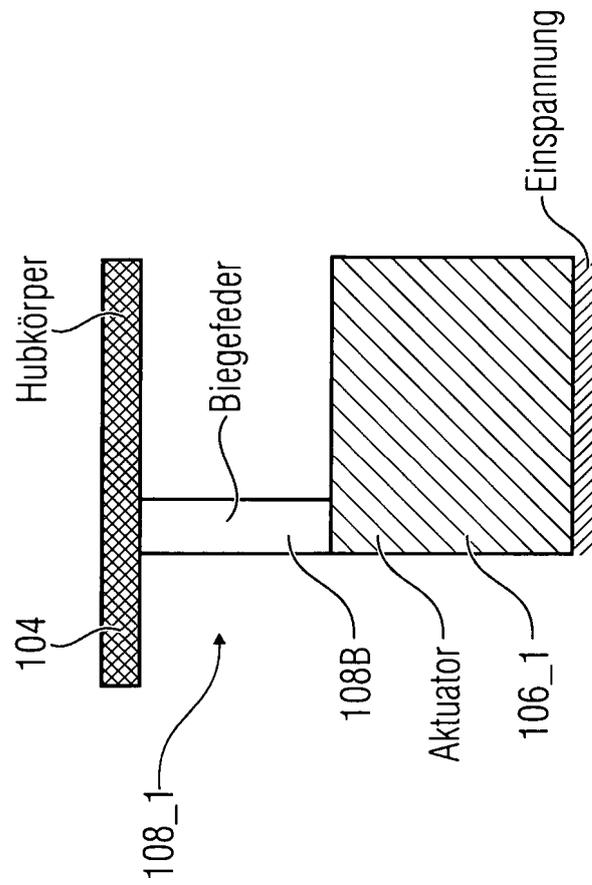


FIG 6A

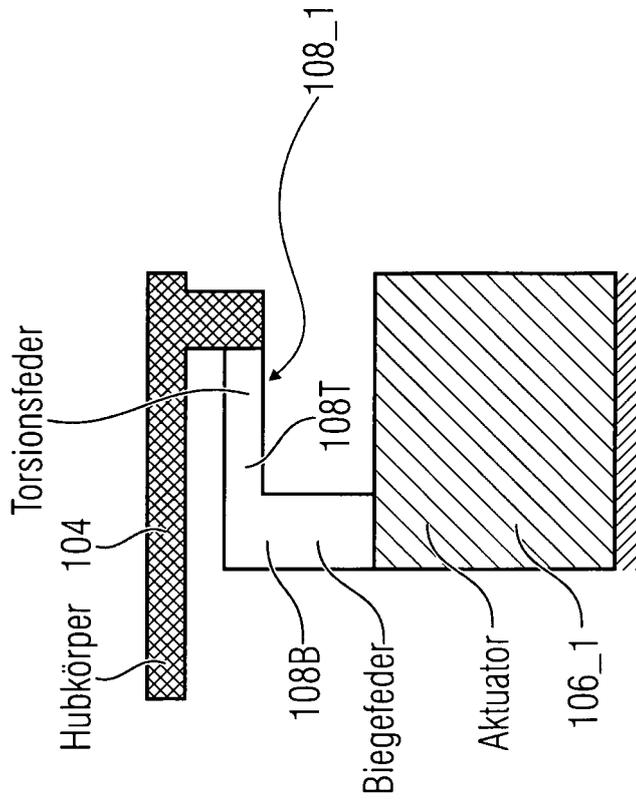


FIG 6D

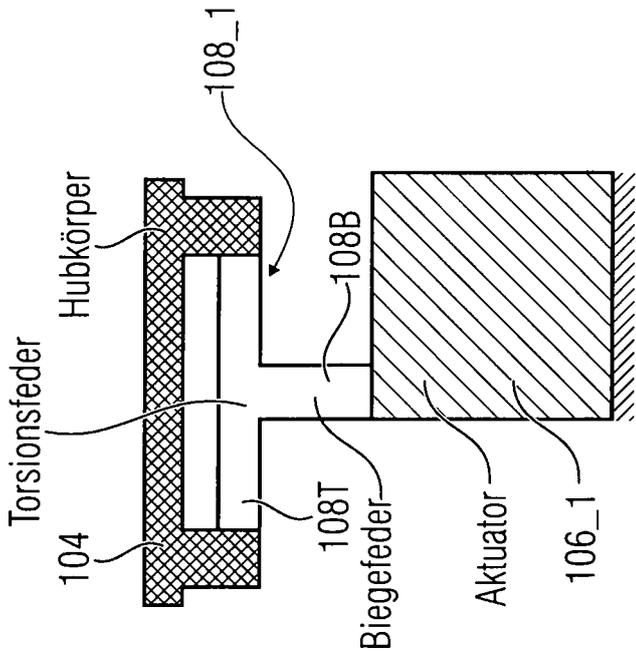


FIG 6C

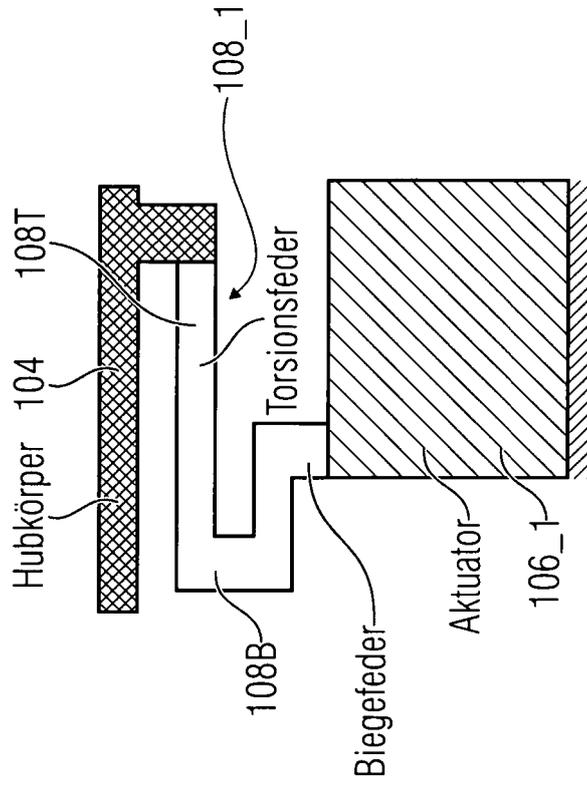


FIG 6E

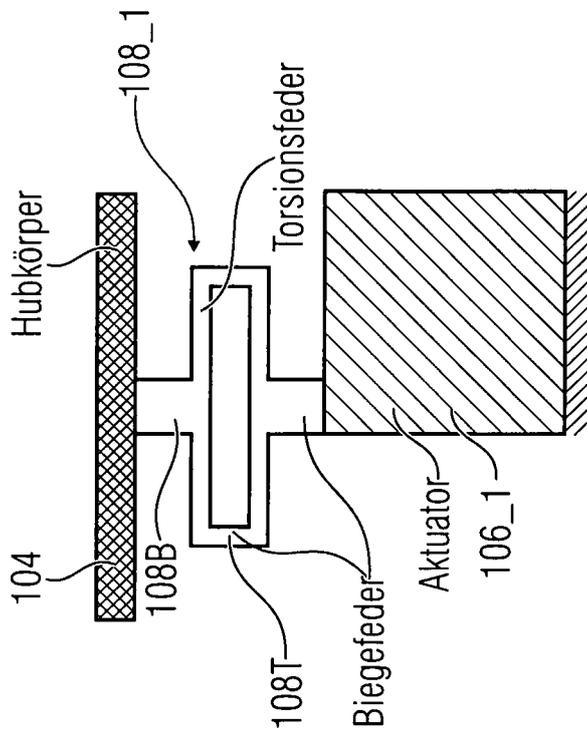


FIG 6F

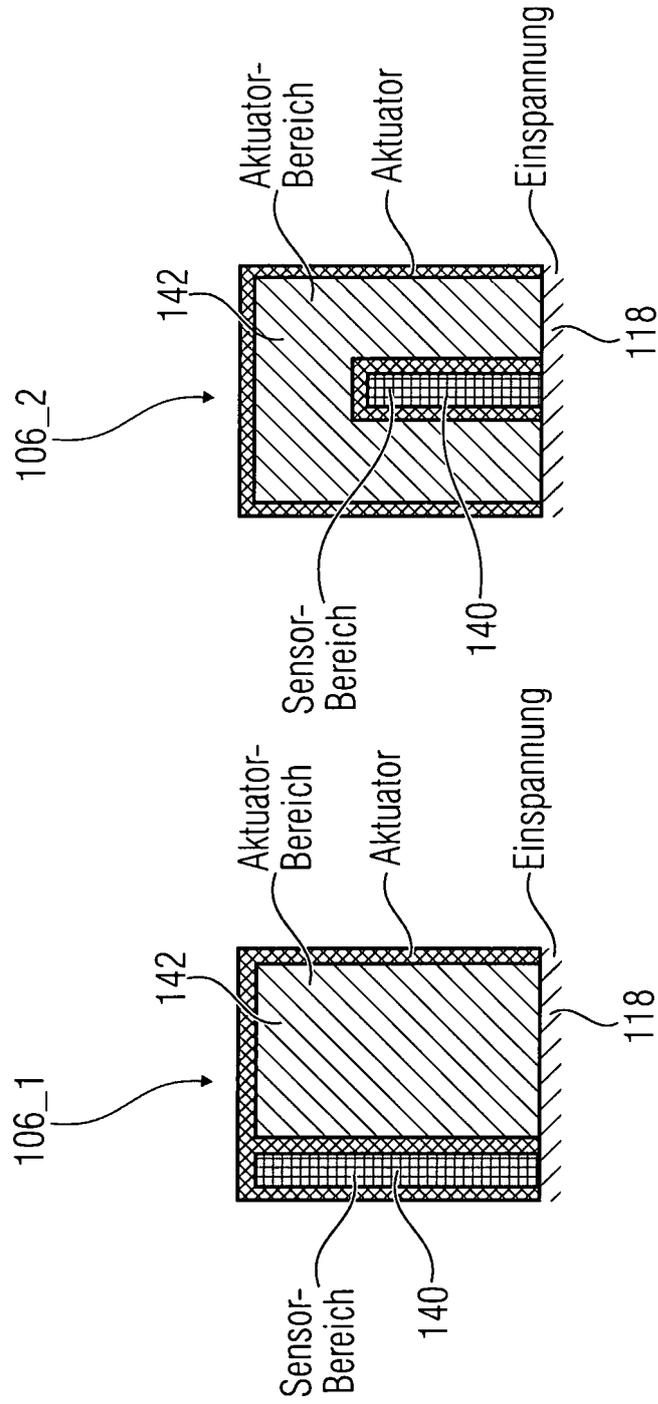


FIG 7B

FIG 7A

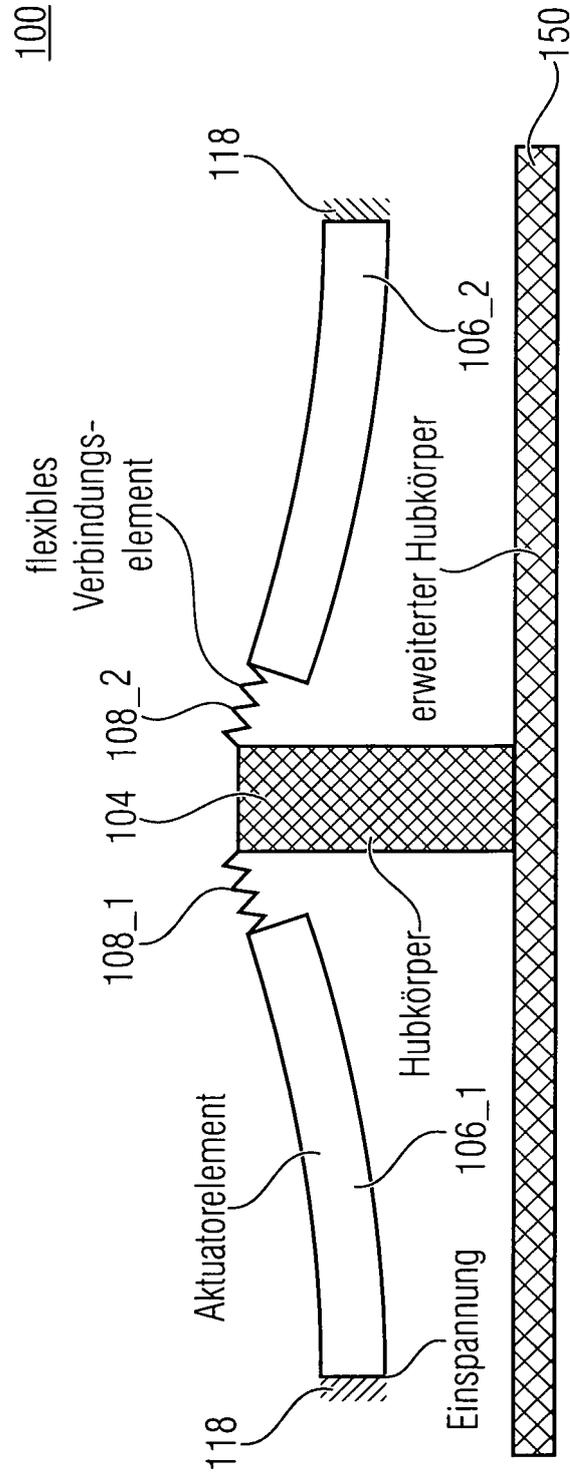


FIG 8



100

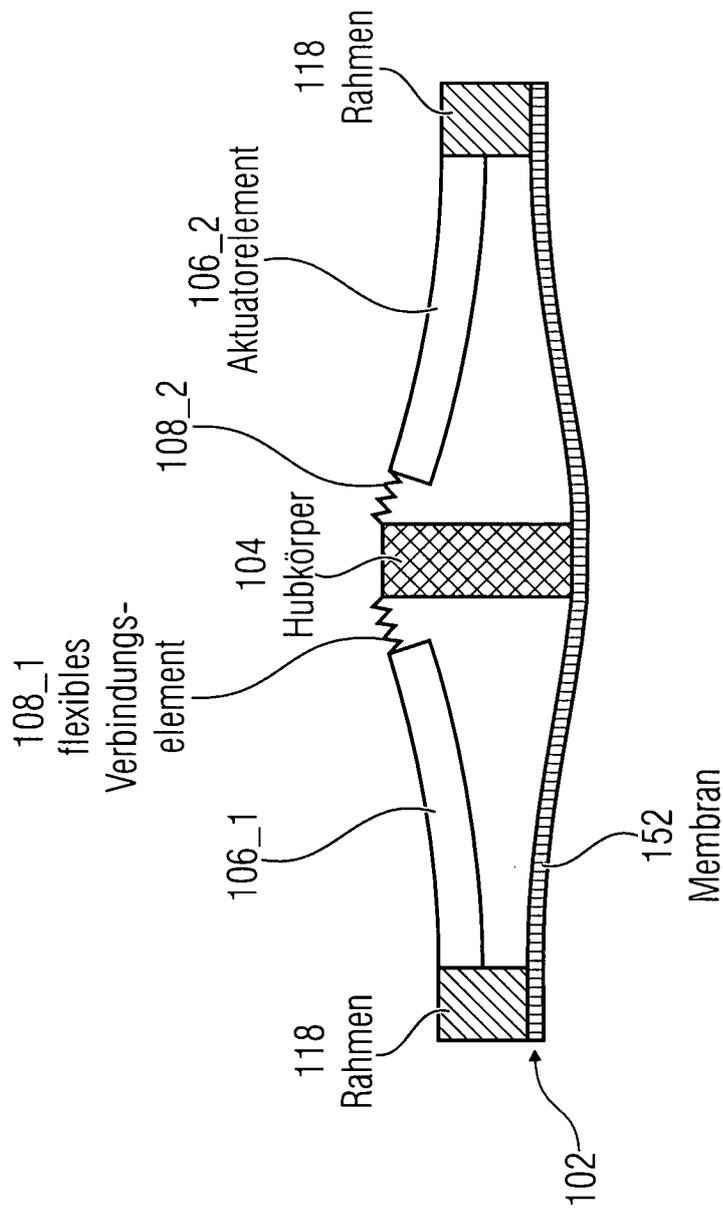


FIG 10A

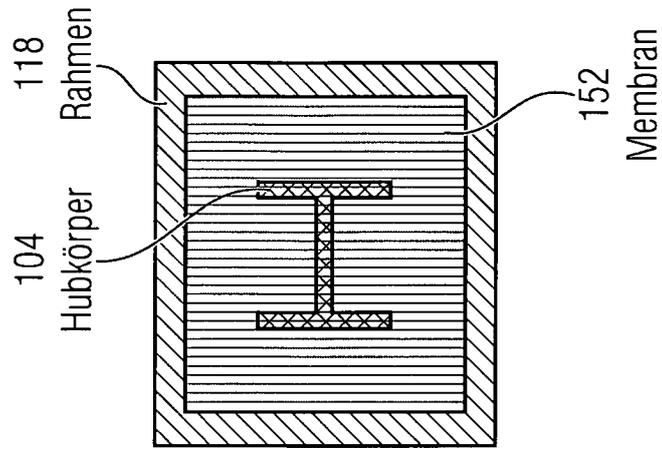


FIG 10B

100

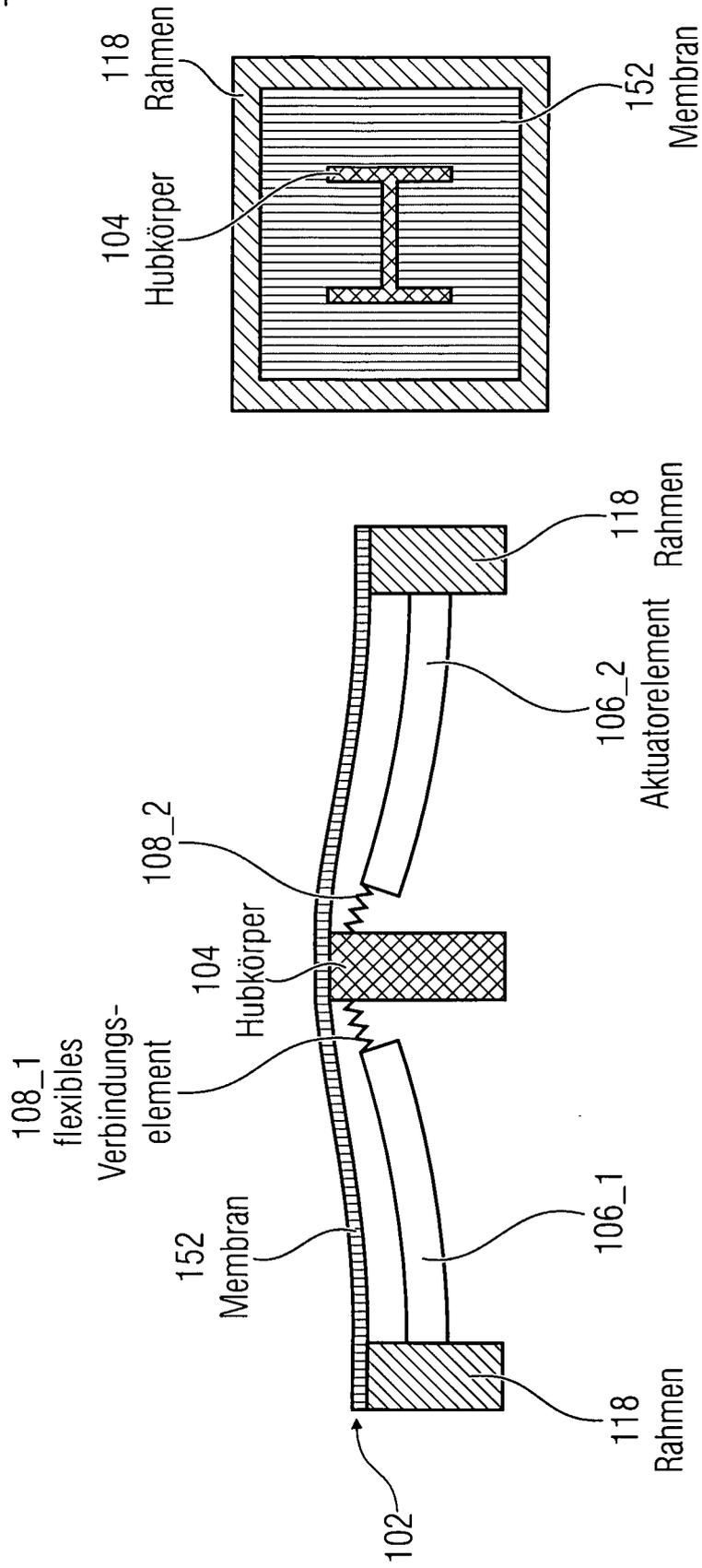


FIG 11B

FIG 11A

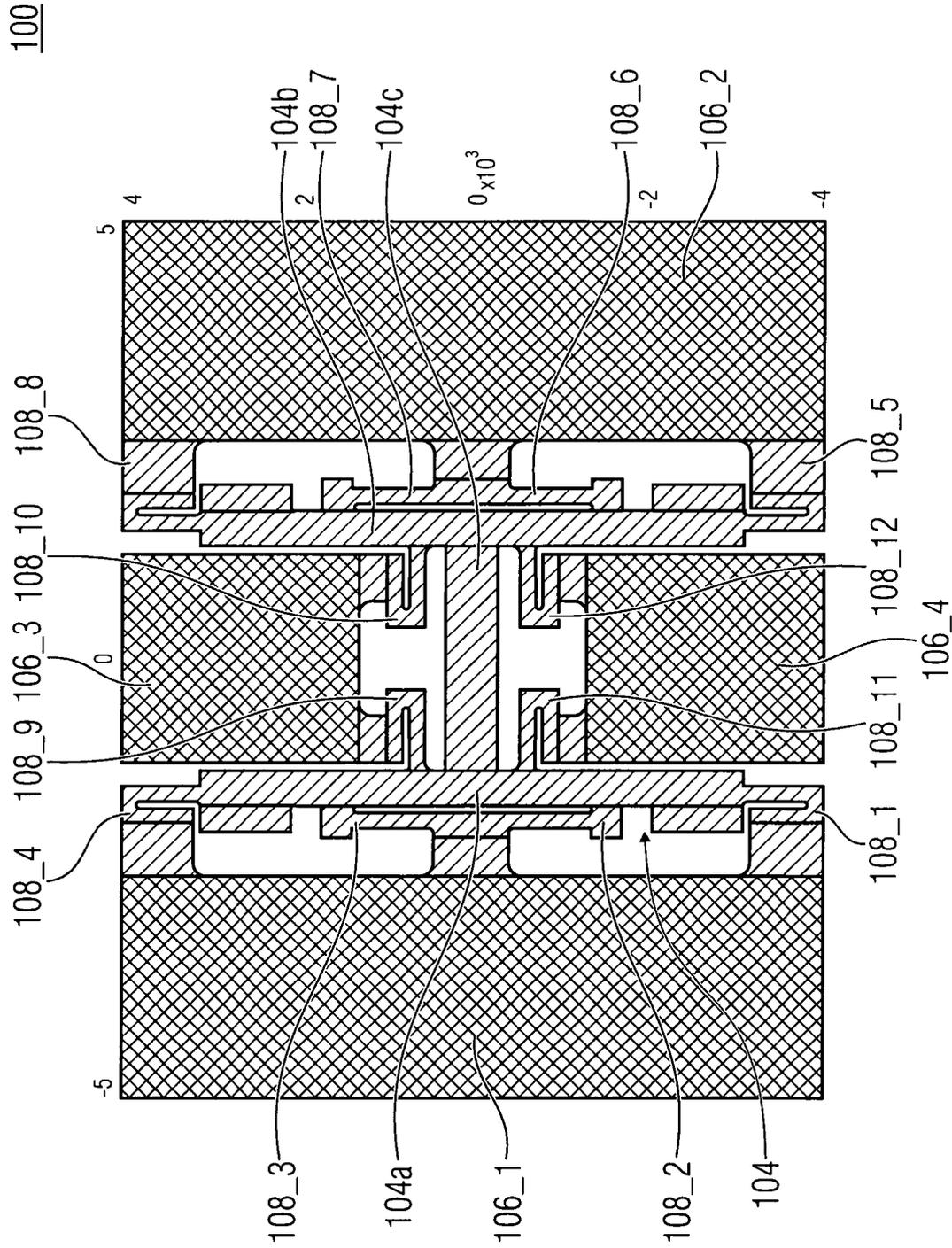


FIG 12A

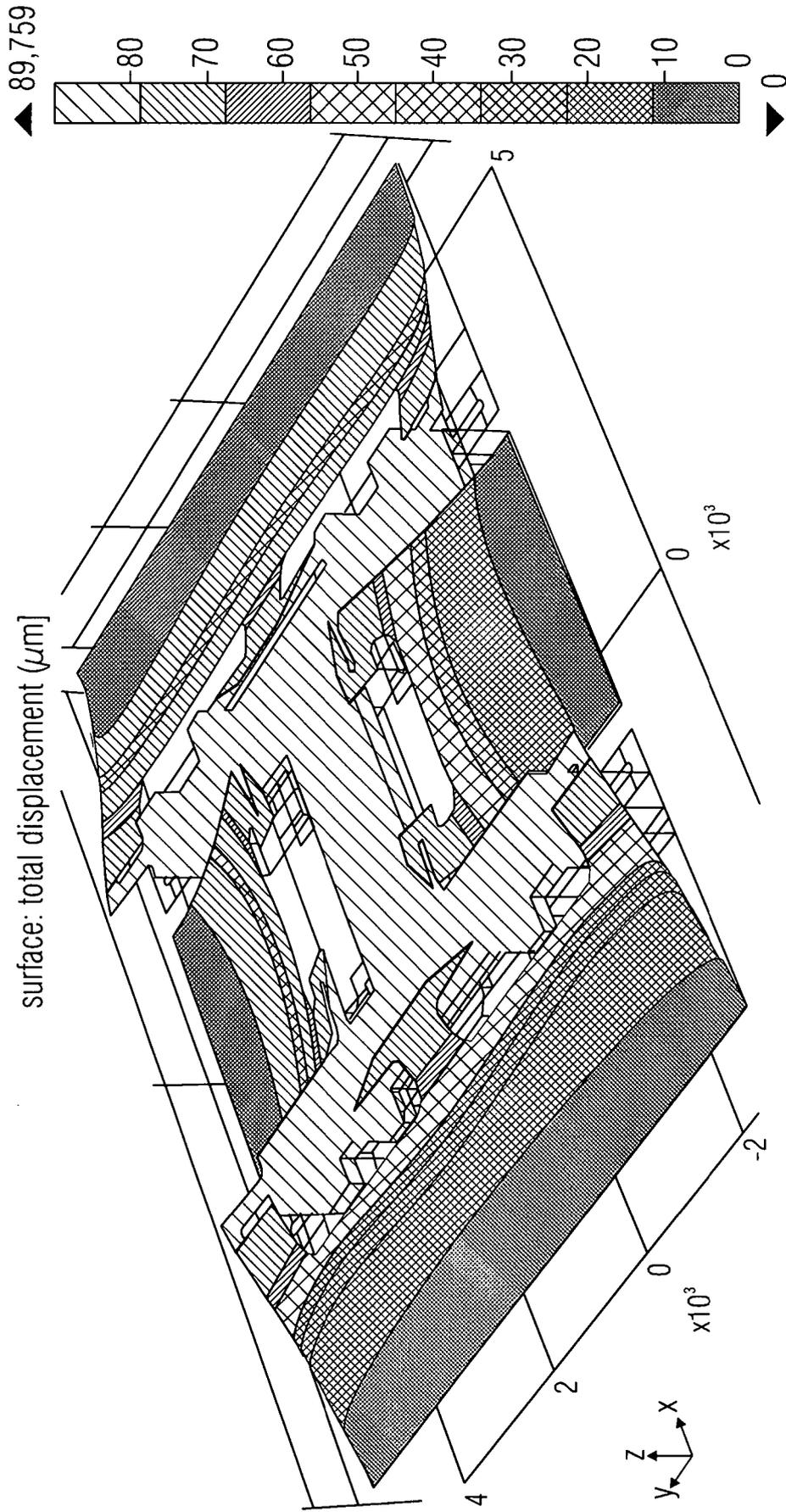


FIG 12B



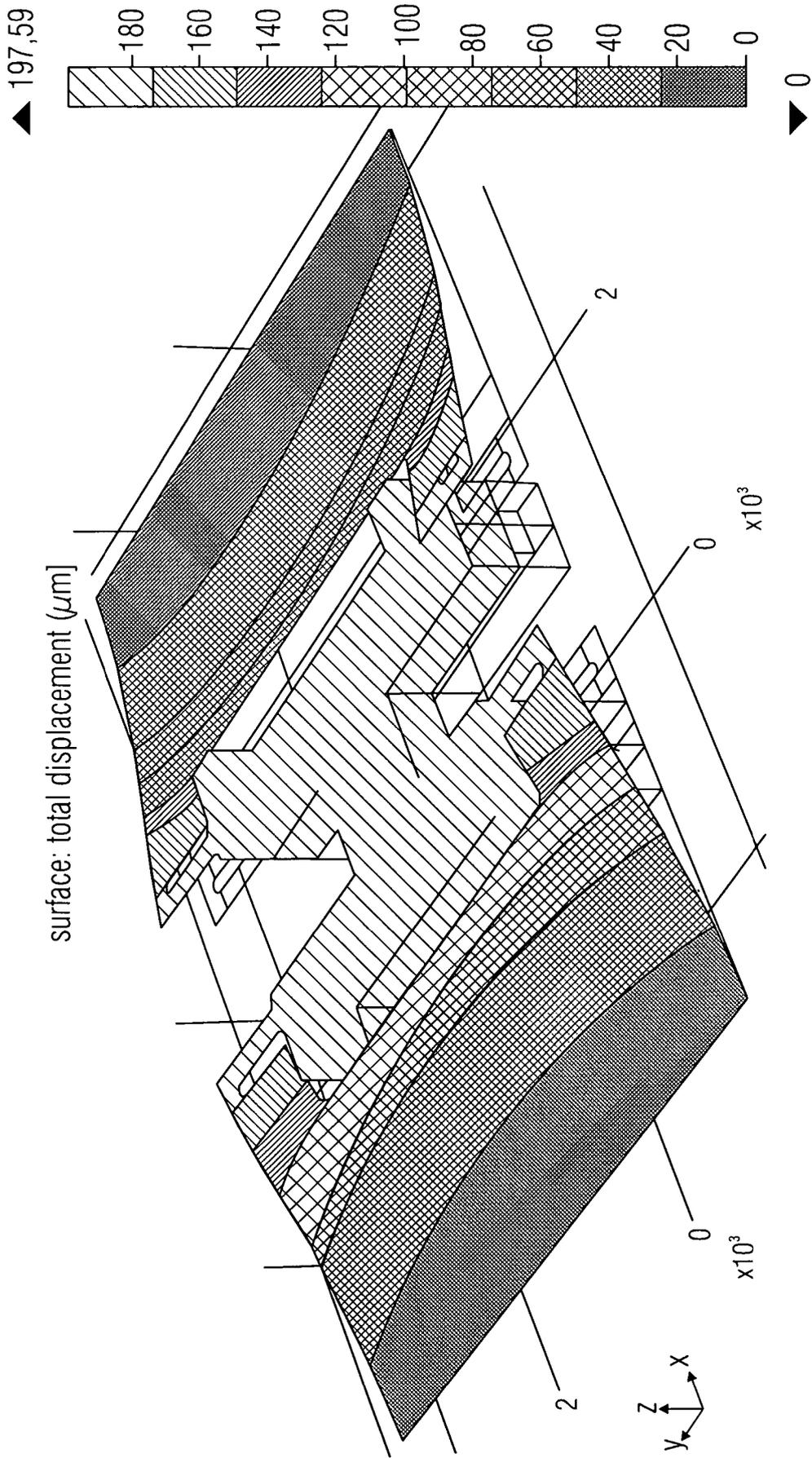


FIG 13B

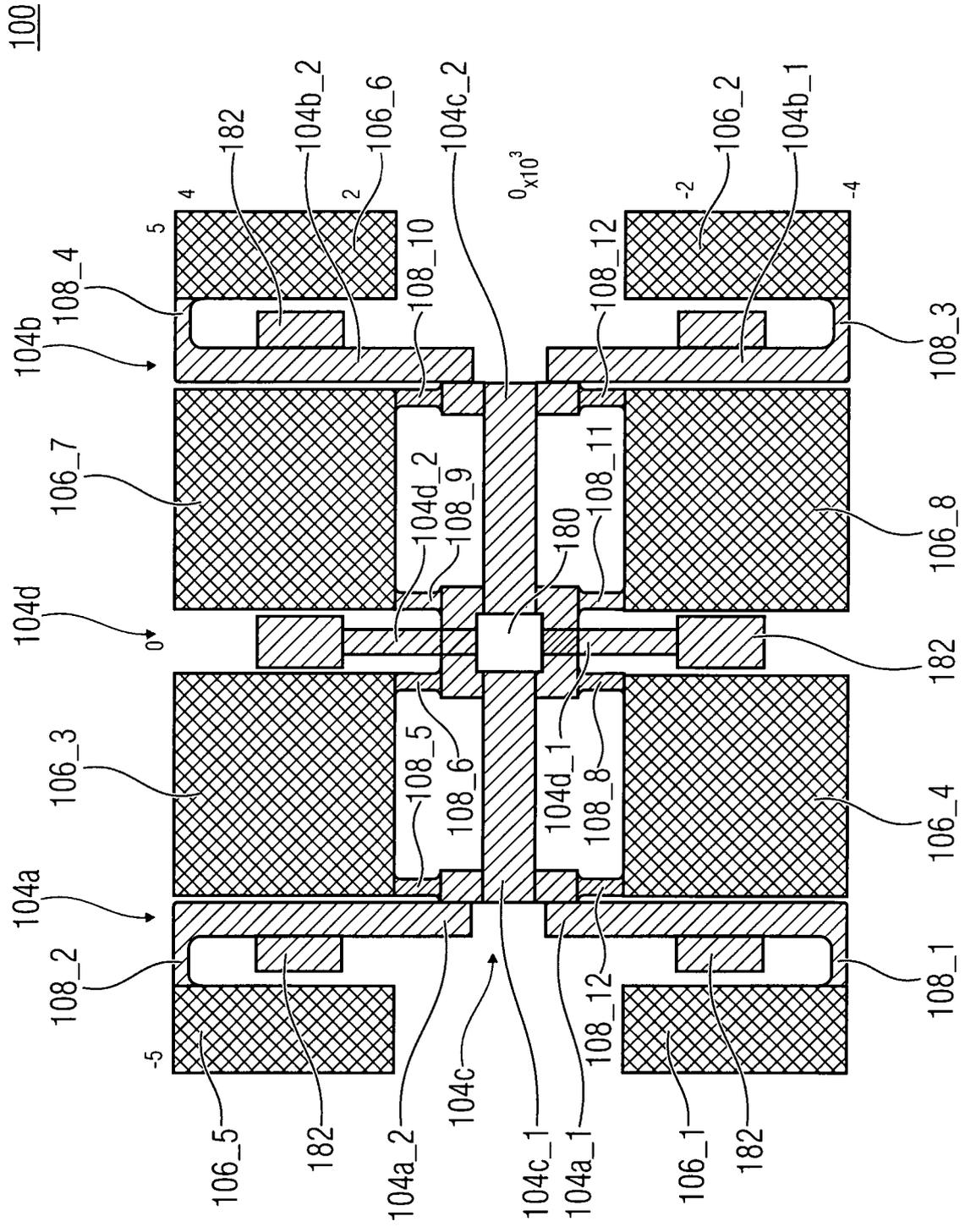


FIG 14A

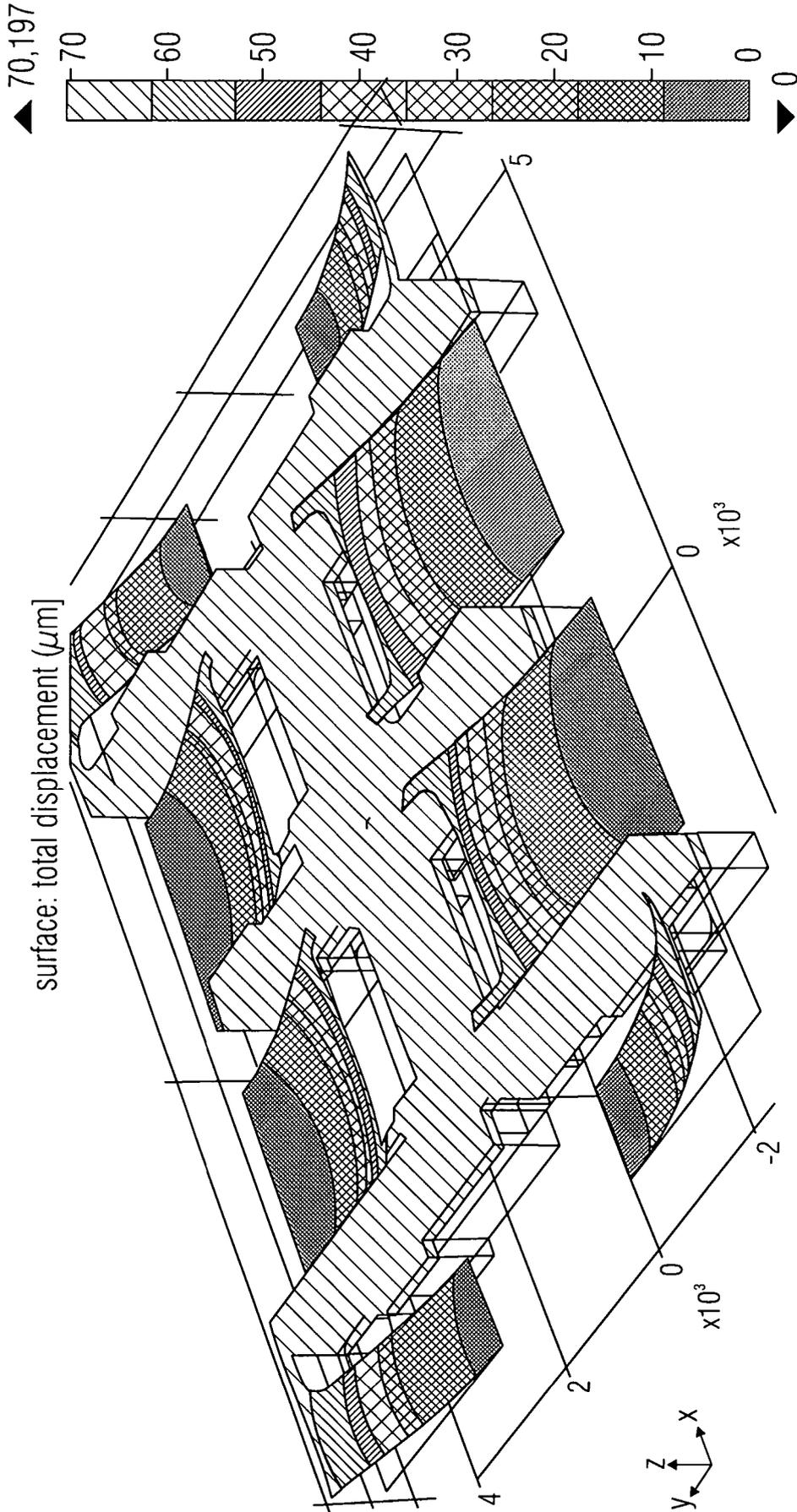


FIG 14B

100

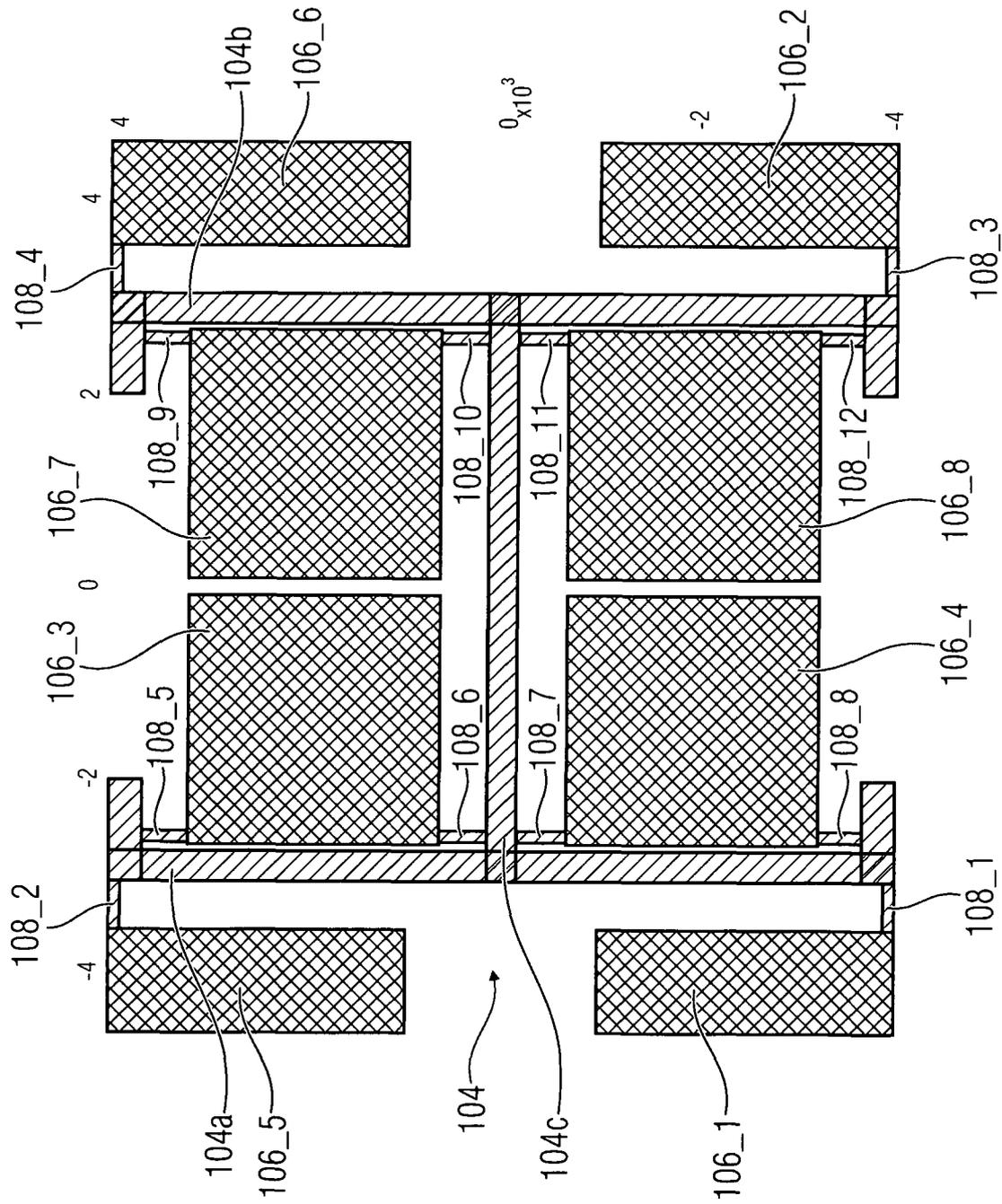


FIG 15A



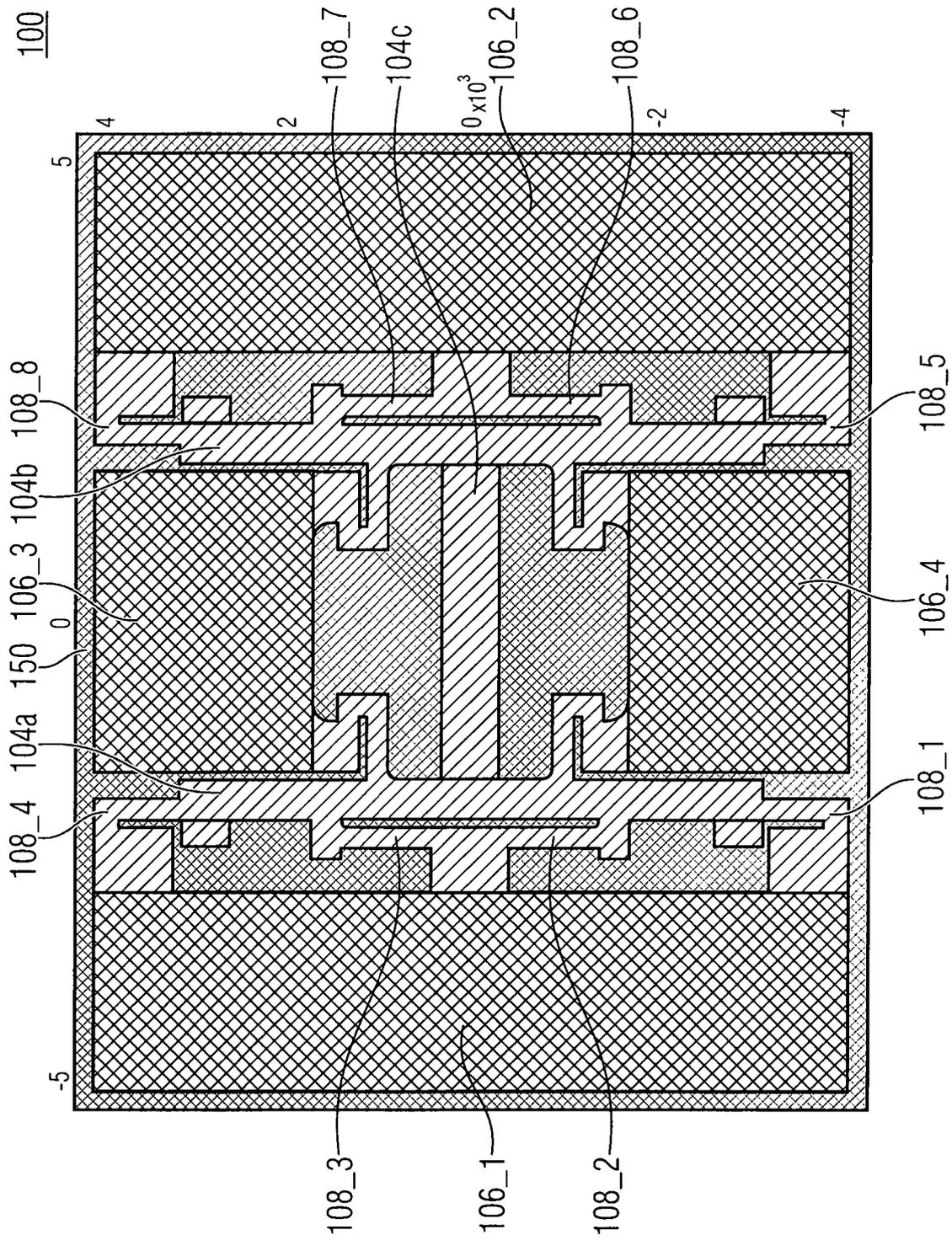


FIG 16A

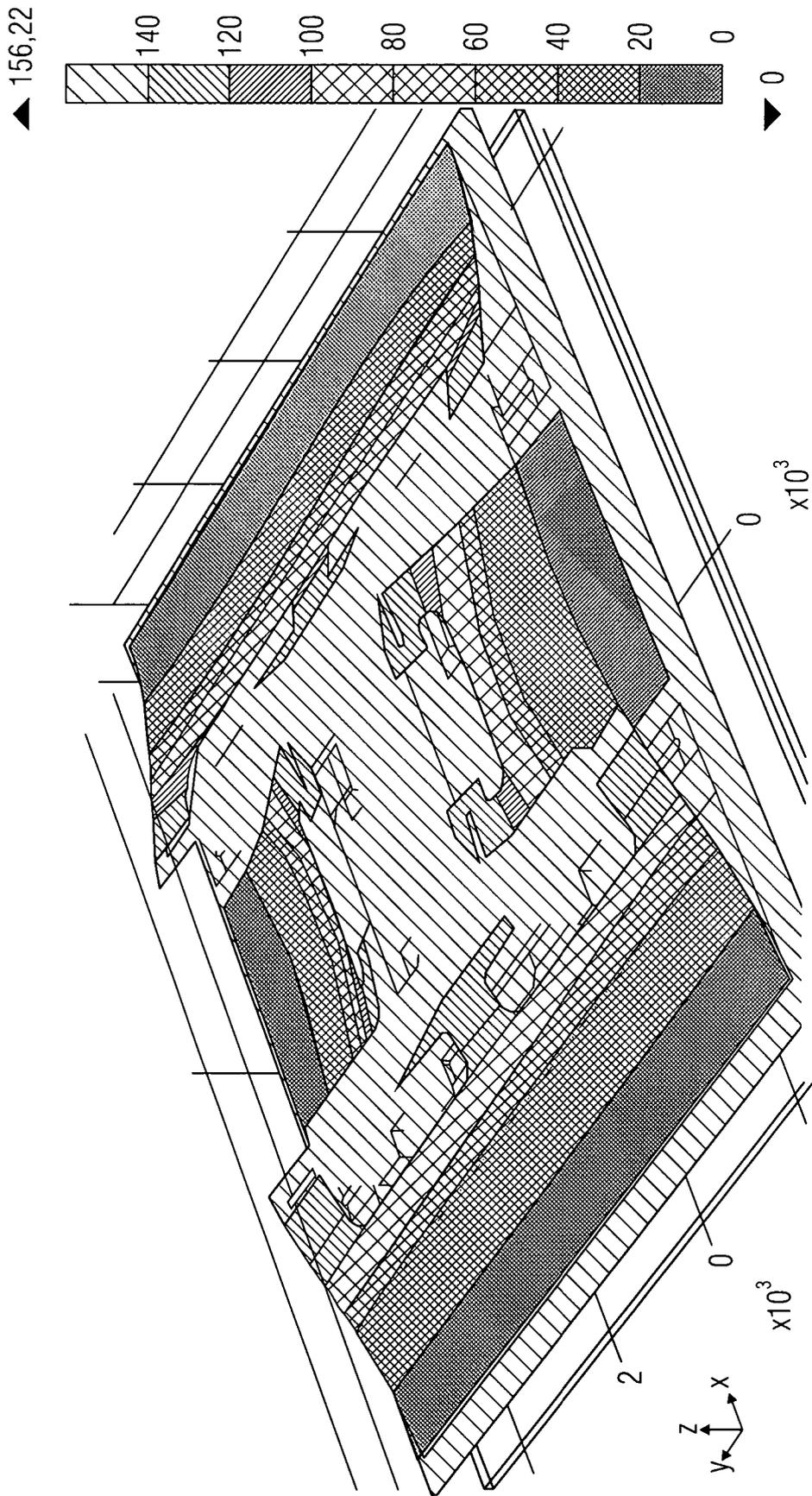


FIG 16B

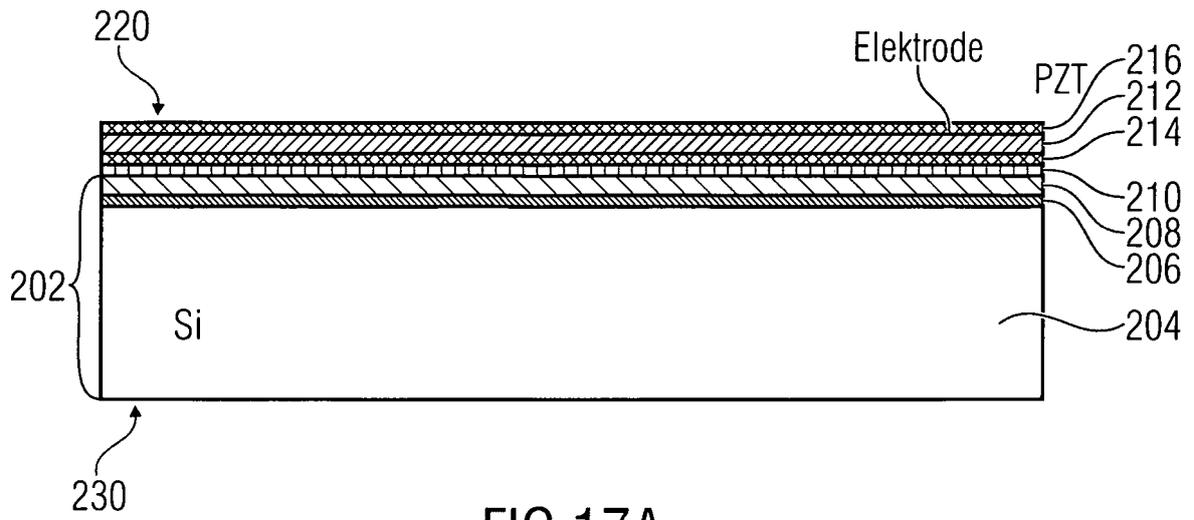


FIG 17A

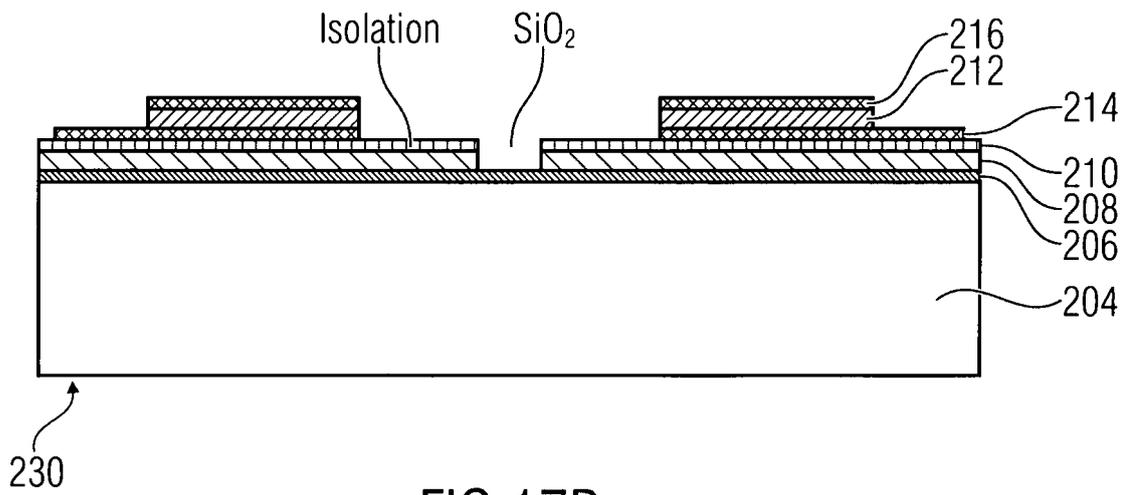


FIG 17B

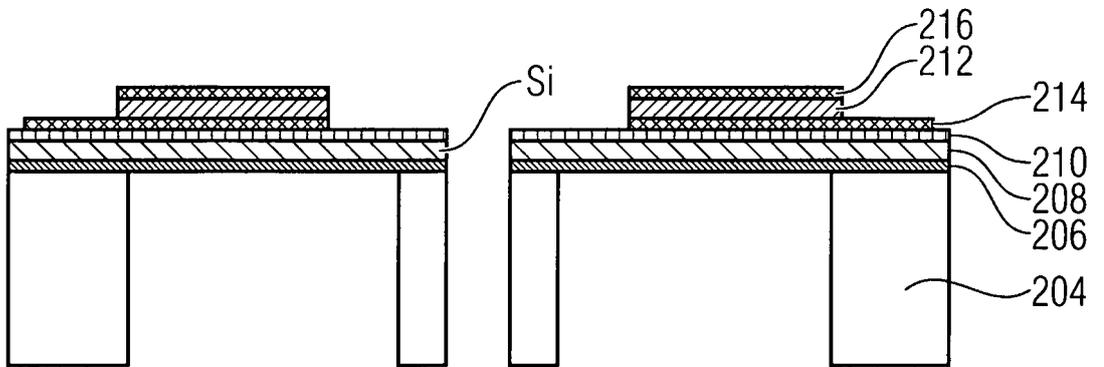


FIG 17C

200

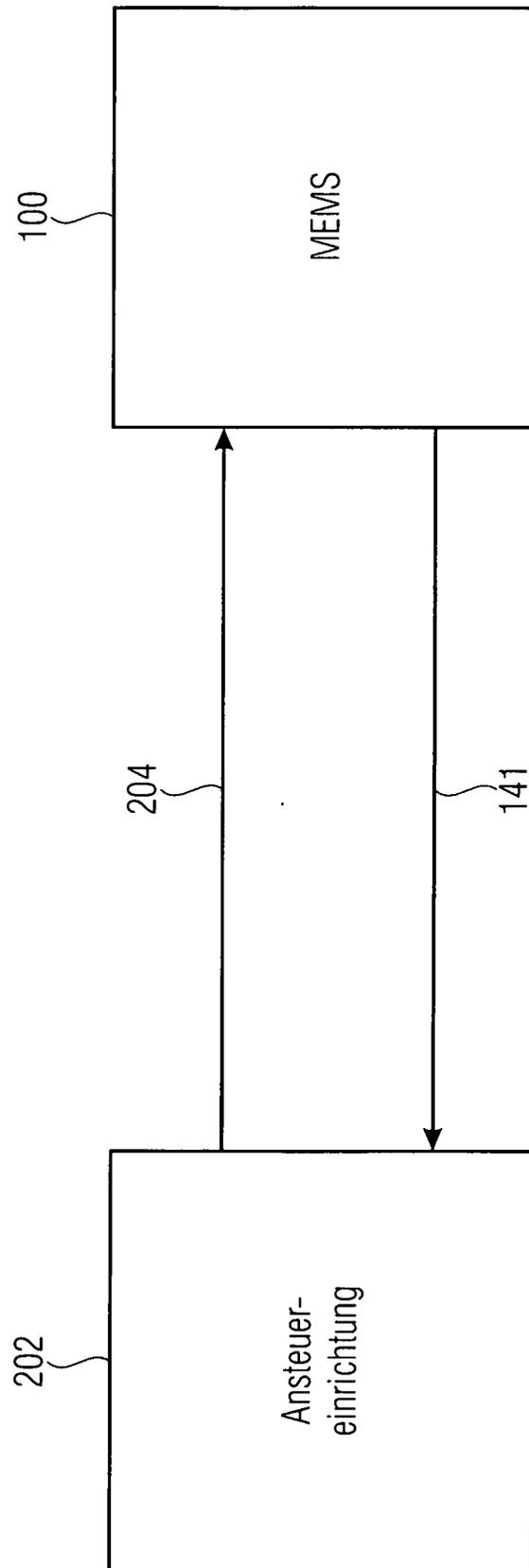


FIG 18