

(12) **Gebrauchsmusterschrift**

(21)	Anmeldenummer:	GM 9039/2022	(51)	Int. Cl.:	G02B 26/08	(2006.01)
(86)	PCT-Anmeldenummer:	PCT/EP22084818			B81B 3/00	(2006.01)
(22)	Anmeldetag:	07.12.2022				
(24)	Beginn der Schutzdauer:	15.10.2024				
(45)	Veröffentlicht am:	15.10.2024				

(30) **Priorität:**
22.12.2021 DE 10 2021 134 310.0 beansprucht.

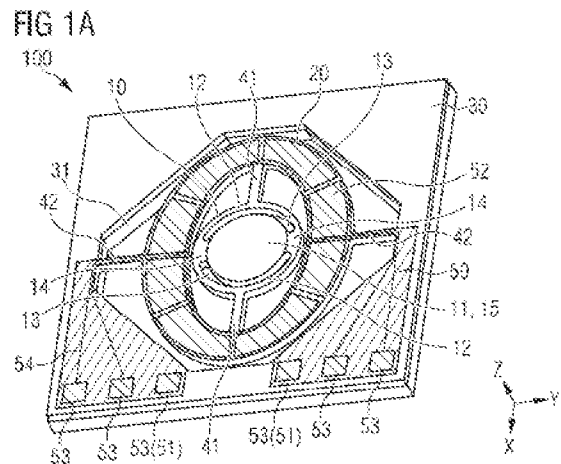
(73) **Gebrauchsmusterinhaber:**
TDK Electronics AG
81671 München (DE)

(72) **Erfinder:**
Wulf Matthias Dr.
8020 Graz (AT)
Rinner Franz Dr.
8523 Frauental an der Laßnitz (AT)

(74) **Vertreter:**
Wildhack Andreas Dipl.-Ing. Dr.
1030 Wien (AT)

(54) **Piezelektrisches Spiegelbauelement, Verfahren zum Betrieb des Piezelektrischen Spiegelbauelements und Projektionsvorrichtung mit dem Piezelektrischen Spiegelbauelement**

(57) Es wird ein piezelektrisches Spiegelbauelement (100) angegeben, das ein Spiegelement (10), einen piezelektrischer Antriebsring (20), der das Spiegelement umgibt und über zumindest ein erstes Torsionsfederelement (41) mit dem Spiegelement verbunden ist, und ein Rahmenelement (30) aufweist, das über zumindest ein zweites Torsionsfederelement (42) mit dem Antriebsring verbunden ist, wobei der Antriebsring einen ersten Durchmesser entlang einer ersten Richtung und einen zweiten Durchmesser entlang einer zur ersten Richtung senkrechten zweiten Richtung aufweist und der erste Durchmesser größer als der zweite Durchmesser ist. Weiterhin werden ein Verfahren zum Betrieb des piezelektrischen Spiegelbauelements und eine Projektionsvorrichtung angegeben.



Beschreibung

[0001] Piezoelektrisches Spiegelbauelement, Verfahren zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements und Projektionsvorrichtung mit dem piezoelektrischen Spiegelbauelement

[0002] Es werden ein piezoelektrisches Spiegelbauelement, ein Verfahren zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements und eine Projektionsvorrichtung mit dem piezoelektrischen Spiegelbauelement angegeben.

[0003] Für Laserprojektoren gibt es eine Vielzahl von Anwendungsbereichen. Beispielsweise werden Projektoren zur Anzeige bewegter Bilder, beispielsweise in Kinos, für Heimkinoanwendungen oder für mobile Zeigeanwendungen, verwendet. Besonders bevorzugt sollten hierfür Projektoren verfügbar sein, die kostengünstig und unempfindlich gegenüber Erschütterungen sind. Weiterhin werden immer öfter Projektoren im Automobilbereich verwendet, beispielsweise zur Projektion von Informationen auf die Straßenoberfläche, für Matrixausleuchtungen oder auch für Anwendungen basierend auf dem LIDAR-Prinzip (LIDAR: „light detection and ranging“, Lichtdetektion und Abstandsmessung). Für derartige Anwendungsfelder wird eine große Tiefenschärfe benötigt, die Laserprojektoren liefern können. Darüber hinaus sind Laserprojektoren vorteilhaft für Anwendungen in Verbindung mit VR („virtual reality“, virtuelle Realität) und AR („augmented reality“, erweiterte Realität), beispielsweise in AR-/VR-Brillen.

[0004] Ein Projektor kann drehbare Spiegel aufweisen, durch die ein zeitlich modulierter Laserstrahl abgelenkt wird. Auf diese Weise wird ein Bild im von einem Betrachter wahrgenommenen Fernfeld erzeugt, so dass sich das projizierte Bild für den Betrachter immer im Fokus befindet und keine Akkomodation des Auges notwendig ist. Im Fall einer AR-/VR-Brille wird der abgelenkte Strahl beispielsweise in ein Wellenleiter-Brillenglas eingekoppelt. Hier bestimmt die Richtung und nicht die Position des Strahls die Position des Bildpunkts für den Betrachter, so dass keine weitere Optik nötig ist. Oft werden zwei Spiegel verwendet, nämlich für jede orthogonale Ablenkungsrichtung einer, mittels derer ein Laserstrahl den Bildbereich in einem orthogonalen Raster abscannt. Alternativ gibt es auch Lösungen mit Laser-Arrays, LED-Arrays (LED: Licht emittierend Diode) oder QLED-Arrays (QLED: Quantenpunkt-Leuchtdiode), die in ihrem Auflösungsvermögen und in ihrer Helligkeit jedoch begrenzt sind, sowie Lösungen, bei denen Laserlicht von einem passiven Panel selektiv reflektiert wird, wobei dies nicht sehr energieeffizient ist. Es besteht daher ein hoher Bedarf an kompakten Lösungen für AR-/VR-Brillen mit guter Bildauflösung.

[0005] Beispielsweise sind aus den im Folgenden aufgeführten Druckschriften Mikrospiegel bekannt: Die Druckschrift U. Baran et al., „Resonant PZT MEMS Scanner for High Resolution Displays“, Journal of Microelectromechanical Systems, 21, 1303-1310, 2012 beschreibt einen Spiegel, der um eine Achse schwingen kann und somit ein eindimensionales Scanning ermöglicht. Die Druckschrift Ch. Pan et al., „A New Two-Axis Optical Scanner Actuated by Piezoelectric Bimorphs“, International Journal of Optomechatronics, 6, 336-349, 2012 beschreibt einen zweidimensional bewegbaren rechteckigen Spiegel, wobei in einer Richtung die Bewegung eine anharmonische Bewegung in einem sogenannten Rocking-Mode ist. Die Druckschrift JP 5345102 B2 und H.-J. Quenzer et al., „Piezoelectrically driven translatory optical MEMS actuator with 7mm apertures and large displacements“, Proc. SPIE 9375, MOEMS and Miniaturized Systems XIV, 937500, 2015 beschreiben um zwei Achsen bewegbare, symmetrisch aufgehängte Spiegel, deren Bewegungen um beide Achsen gleichartig sind, was zu unerwünschtem Kopplungsverhalten führen kann. Die Druckschrift M. Tani et al., „A Combination of Fast Resonant Mode and Slow Static Deflection of SOI-PZT Actuators for MEMS Image Projection Display“, Proc. IEEE/LEOS Int. Conf. Opt. MEMS Appl. Conf., 25-26, 2006 beschreibt ebenfalls einen um zwei Achsen bewegbaren Spiegel, wobei der Aktuator für eine der Drehbewegungen große Meanderstrukturen aufweist, die wenig kompakt sind, nur eine niedrige Resonanzfrequenz ermöglichen und weiterhin schockempfindlich sein können. Die Druckschrift H. Yu et al., „Optimization of MOEMS Projection Module Performance with Enhanced Piezoresistive Sensitivity“, Micromachines 2020, 11, 651 beschreibt einen elektromagnetisch angetriebenen Spiegel.

[0006] Zumindest eine Aufgabe von bestimmten Ausführungsformen ist es, ein piezoelektrisches

Spiegelbauelement anzugeben. Zumindest eine weitere Aufgabe von bestimmten Ausführungsformen ist es, ein Verfahren zum Betrieb eines piezoelektrischen Spiegelbauelements anzugeben. Zumindest eine weitere Aufgabe von bestimmten Ausführungsformen ist es, eine Projektionsvorrichtung mit einem piezoelektrischen Spiegelbauelement anzugeben.

[0007] Diese Aufgaben werden durch Gegenstände und ein Verfahren gemäß den unabhängigen Ansprüchen gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen der Gegenstände und des Verfahrens sind in den abhängigen Ansprüchen gekennzeichnet und gehen weiterhin aus der nachfolgenden Beschreibung und den Zeichnungen hervor.

[0008] Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist ein piezoelektrisches Spiegelbauelement, das im Folgenden auch kurz als Spiegelbauelement bezeichnet sein kann, ein Spiegelelement, einen piezoelektrischen Antriebsring und ein Rahmenelement auf. Der Antriebsring umgibt das Spiegelelement und ist über zumindest ein erstes Torsionsfederelement mit dem Spiegelelement verbunden. Das Rahmenelement ist über zumindest ein zweites Torsionsfederelement mit dem Antriebsring verbunden. Das Spiegelelement, der Antriebsring und das Rahmenelement sowie die Torsionsfederelemente können in einem Ruhezustand des Spiegelbauelements insbesondere entlang einer Ebene ausgerichtet sein.

[0009] Zumindest auf dem Antriebsring ist eine piezoelektrische Schicht aufgebracht, die zwischen einer ersten Elektrode und einer zweiten Elektrode angeordnet ist. Die piezoelektrische Schicht kann ein oder mehrere piezoelektrische Materialien aufweisen. Besonders bevorzugt weist die piezoelektrische Schicht ein piezoelektrisches Material basierend auf Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) auf oder ist daraus.

[0010] Zumindest die zweite Elektrode ist bevorzugt in eine Mehrzahl von Ansteuerbereichen strukturiert. Das bedeutet, dass die zweite Elektrode eine Mehrzahl von voneinander unabhängig ansteuerbare Bereiche aufweisen kann. Die erste Elektrode und/oder die piezoelektrische Schicht können zusammenhängend aufgebracht sein oder auch zumindest teilweise strukturiert sein. Somit sind auf dem Antriebsring bevorzugt die erste Elektrode und die in eine Mehrzahl von Ansteuerbereichen strukturierte zweite Elektrode aufgebracht, wobei zwischen der ersten und zweiten Elektrode die piezoelektrische Schicht angeordnet ist. Besonders bevorzugt sind die erste Elektrode, die piezoelektrische Schicht und die zweite Elektrode in dieser Reihenfolge aufgebracht. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der ersten Elektrode und zumindest einem Ansteuerbereich der zweiten Elektrode kann über den inversen Piezoeffekt eine mechanische Verformung der piezoelektrischen Schicht und damit des Antriebsrings in einem Teilbereich erreicht werden, wodurch auf den Antriebsring und/oder das Spiegelelement eine Kraft ausgeübt werden kann. Jeder der Ansteuerbereiche kann somit mit der piezoelektrischen Schicht und der ersten Elektrode ein Piezoelement bilden, durch das ein Teilbereich des Spiegelbauelements bewegt werden kann. Durch Anlegen eines Wechselstromsignals mit einer oszillierenden elektrischen Spannung kann eine oszillierende Kraft ausgeübt werden, die eine oszillierende Verformung bewirken kann. Dadurch kann zumindest ein Teil des Spiegelbauelements in Schwingungen versetzt werden.

[0011] Das zumindest eine erste Torsionsfederelement und das zumindest eine zweite Torsionsfederelement können insbesondere als sogenannte Torsionsbalken ausgebildet sein. Mit anderen Worten ist jedes der Torsionsfederelemente länglich in Form eines Balkens mit einer Längsrichtung geformt, der, insbesondere im Betrieb des Spiegelbauelements, eine Torsionsbewegung um eine Drehachse ausführen kann, wobei die Drehachse bevorzugt im Wesentlichen der Längsrichtung des Balkens entspricht.

[0012] Das zumindest eine erste Torsionsfederelement erstreckt sich bevorzugt vom Spiegelelement zum Antriebsring und definiert eine erste Drehachse. Werden das Spiegelelement und der Antriebsring relativ zueinander um die erste Drehachse verdreht, so verdreht sich das dem Spiegelelement nähere Ende des zumindest einen ersten Torsionsfederelements relativ zum dem Antriebsring näheren Ende des zumindest einen ersten Torsionsfederelements. Insbesondere kann durch eine geeignete Ansteuerung von Ansteuerbereichen der zweiten Elektrode mit einem ersten Wechselstromsignal mit einer ersten Frequenz bewirkt werden, dass das Spiegelelement

in eine erste Drehschwingung mit der ersten Frequenz versetzt wird, wobei über das zumindest eine erste Torsionsfederelement eine bevorzugt linear vom Drehwinkel abhängige Rückstellkraft auf das Spiegelement ausgeübt wird. Eine derartige Drehschwingung an zumindest einem Torsionsfederelement wird im Folgenden auch als Torsionsschwingung bezeichnet. Somit kann die erste Drehschwingung auch als erste Torsionsschwingung bezeichnet werden.

[0013] Das zumindest eine zweite Torsionsfederelement erstreckt sich bevorzugt vom Antriebsring zum Rahmenelement und definiert eine zweite Drehachse. Werden das Rahmenelement und der Antriebsring relativ zueinander um die zweite Drehachse gedreht, so verdreht sich das dem Rahmenelement nähere Ende des zumindest einen zweiten Torsionsfederelements relativ zum dem Antriebsring näheren Ende des zumindest einen zweiten Torsionsfederelements. Insbesondere kann durch eine geeignete Ansteuerung von Ansteuerbereichen der zweiten Elektrode mit einem zweiten Wechselstromsignal mit einer zweiten Frequenz bewirkt werden, dass der Antriebsring in eine zweite Drehschwingung mit der zweiten Frequenz versetzt wird, wobei über das zumindest eine zweite Torsionsfederelement eine bevorzugt linear vom Drehwinkel abhängige Rückstellkraft auf den Antriebsring ausgeübt wird. Insbesondere kann das Spiegelement zusammen mit dem Antriebsring die zweite Drehschwingung vollziehen. Die beschriebene zweite Drehschwingung kann auch als zweite Torsionsschwingung bezeichnet werden.

[0014] Besonders bevorzugt sind das erste Torsionsfederelement und das zweite Torsionsfederelement um 90° zueinander gedreht angeordnet, so dass die erste Drehachse für die erste Torsionsschwingung und die zweite Drehachse für die zweite Torsionsschwingung senkrecht zueinander stehen. Dadurch kann erreicht werden, dass die erste und zweite Torsionsschwingung möglichst unabhängig voneinander sind.

[0015] Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist auch auf dem Rahmenelement zumindest teilweise die erste Elektrode aufgebracht. Weiterhin kann auch auf dem Rahmenelement zumindest teilweise die piezoelektrische Schicht aufgebracht sein. Zusätzlich kann auch auf dem Rahmenelement zumindest teilweise die zweite Elektrode aufgebracht sein. Weiterhin können auch auf dem zumindest einen zweiten Torsionsfederelement die erste Elektrode und/oder die piezoelektrische Schicht aufgebracht sein. Weiterhin kann das zumindest eine zweite Torsionsfederelement frei von der zweiten Elektrode sein. Besonders bevorzugt sind das zumindest eine erste Torsionsfederelement und das Spiegelement frei von der ersten Elektrode, der piezoelektrischen Schicht und der zweiten Elektrode.

[0016] Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die zweite Elektrode auf dem Rahmenelement in eine Mehrzahl von Ansteuerbereichen strukturiert. Insbesondere kann die zweite Elektrode in einem von einem Randteil des Rahmenelements umgebenen Aktuationsbereich des Rahmenelements aufgebracht sein. Dadurch kann es möglich sein, zusätzlich zu den Ansteuerbereichen auf dem Antriebsring weitere Ansteuerbereiche auf dem Rahmenelement vorzusehen, durch die bei einer geeigneten Ansteuerung eine Kraft beispielsweise auf den Antriebsring ausgeübt werden kann.

[0017] Weiterhin können auf dem Rahmenelement, beispielsweise auf einem Randteil des Rahmenelements, Kontaktelemente zur Ansteuerung der ersten und zweiten Elektrode vorhanden sein. Ansteuerbereiche auf dem Antriebsring und/oder auf dem Rahmenelement können über Leiterbahnen, die über das zumindest eine zweite Torsionsfederelement verlaufen, mit Kontaktelementen auf dem Rahmenelement verbunden sein.

[0018] Alternativ dazu kann es auch möglich sein, auf Leiterbahnen zu verzichten und direkt auf die Elektroden zu bonden. Dadurch kann es möglich sein, parasitäre Widerstände und Kapazitäten, die im Zusammenhang mit Leiterbahn aufzutreten können, zu vermeiden.

[0019] Bei einem Verfahren zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements wird, wie vorab beschrieben, bevorzugt das Spiegelement mittels eines ersten elektrischen Wechselstromsignals mit einer ersten Frequenz, das auf erste Ansteuerbereiche wirkt, in eine erste Torsionsschwingung versetzt. Der Antriebsring, bevorzugt zusammen mit dem Spiegelement, wird mittels eines zweiten elektrischen Wechselstromsignals mit einer zweiten Frequenz, das auf

zweite Ansteuerbereiche wirkt, in eine zweite Torsionsschwingung versetzt. Insbesondere kann die Ansteuerung mit dem ersten Wechselstromsignal und die Ansteuerung mit dem zweiten Wechselstromsignal gleichzeitig erfolgen, so dass das insbesondere Spiegelement die beiden Torsionsschwingungen gleichzeitig ausführen kann, wobei das Spiegelement relativ zum Antriebsring um die erste Drehachse mit der ersten Frequenz oszilliert und der Antriebsring zusammen mit dem Spiegelement relativ zum Rahmenelement um die zweite Drehachse mit der zweiten Frequenz oszilliert. Die erste Frequenz und die zweite Frequenz können insbesondere Resonanzfrequenzen sein oder zumindest nahe bei einer jeweiligen Resonanzfrequenz liegen, die abhängig von den jeweils schwingenden Teilen des Spiegelbauelements und deren geometrischen Ausgestaltungen sein können. Besonders bevorzugt sind die erste Frequenz und die zweite Frequenz unterschiedlich.

[0020] Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist eine Projektionsvorrichtung eine Laserlichtquelle und das piezoelektrische Spiegelbauelement auf. Das Spiegelbauelement kann im Betrieb von der Laserlichtquelle abgestrahltes Laserlicht ablenken. Durch die vorab beschriebenen Torsionsschwingungen des Spiegelements kann durch das abgelenkte Laserlicht ein von einem Betrachter wahrnehmbarer Bildbereich überstrichen werden. Mit anderen Worten kann mit dem Spiegelbauelement ein Scanning erreicht werden. Besonders bevorzugt kann bei wie vorab erwähnten resonanten oder naheresonanten Torsionsschwingungen um die erste Drehachse und um die zweite Drehachse, die besonders bevorzugt senkrecht zueinander stehen, ein sogenanntes Lissajous-Scanning erreicht werden.

[0021] Die vorab und nachfolgend beschriebenen Merkmale und Ausführungsformen beziehen sich gleichermaßen auf das piezoelektrische Spiegelbauelement, auf das Verfahren zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements und auf die Projektionsvorrichtung mit dem piezoelektrischen Spiegelbauelement.

[0022] Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist der Antriebsring einen ersten Durchmesser entlang einer ersten Richtung und einen zweiten Durchmesser entlang einer zur ersten Richtung senkrechten zweiten Richtung auf, wobei der erste Durchmesser verschieden zum zweiten Durchmesser ist. Besonders bevorzugt ist der erste Durchmesser größer als der zweite Durchmesser. Somit weist der Antriebsring keine Kreisform auf. Insbesondere kann der Antriebsring eine elliptische Form aufweisen oder zumindest an eine elliptische Form angenähert sein.

[0023] Der Antriebsring kann durch einen inneren Rand, der dem Spiegelement zugewandt ist, und einen gegenüber liegenden äußeren Rand in Richtungen entlang der durch die erste und zweite Richtung aufgespannte Ebene begrenzt sein, wobei der innere und der äußere Rand jeweils eine elliptische Form aufweisen können oder zumindest an eine elliptische Form angenähert sein können. Die Form des äußeren Rands kann durch den ersten Durchmesser und den zweiten Durchmesser definiert sein. Mit anderen Worten können der vorgenannte erste und zweite Durchmesser ein erster und zweiter Außendurchmesser des Antriebsrings sein. Der innere Rand kann ebenfalls einen ersten und einen zweiten Durchmesser aufweisen, die auch als erster und zweiter Innendurchmesser bezeichnet werden können, wobei der erste Innendurchmesser entlang der ersten Richtung und der zweite Innendurchmesser entlang der zweiten Richtung verlaufen. Das Verhältnis des ersten Außendurchmessers zum zweiten Außendurchmesser kann gleich oder unterschiedlich zum Verhältnis des ersten Innendurchmessers zum zweiten Innendurchmesser sein. Sind die Verhältnisse unterschiedlich, kann das insbesondere bedeuten, dass der Antriebsring entlang der ersten Richtung eine erste Breite und entlang der zweiten Richtung eine zweite Breite aufweist und die erste Breite verschieden von der zweiten Breite ist. Beispielsweise kann die erste Breite kleiner als die zweite Breite sein.

[0024] Insbesondere kann das zumindest eine erste Torsionsfederelement entlang der ersten Richtung angeordnet sein, während das zumindest eine zweite Torsionsfederelement entlang der zweiten Richtung angeordnet ist. Besonders bevorzugt ist der Antriebsring über zwei erste Torsionsfederelemente mit dem Spiegelement verbunden, die entlang einer Geraden entlang der ersten Richtung an zwei gegenüber liegenden Seiten des Spiegelements angeordnet sind. Weiterhin ist besonders bevorzugt der Antriebsring über zwei zweite Torsionsfederelemente mit dem

Rahmenelement verbunden, die entlang einer Geraden entlang der zweiten Richtung an zwei gegenüber liegenden Seiten des Antriebsrings angeordnet sind. Jedes der ersten Torsionsfederelemente und jedes der zweiten Torsionsfederelemente kann Merkmale aufweisen, die jeweils im Zusammenhang mit dem zumindest einen Torsionsfederelement und dem zumindest einen zweiten Torsionsfederelement beschrieben sind. Insbesondere kann das Spiegelement ausschließlich durch die ersten Torsionsfederelemente mit dem Antriebsring verbunden sein, während der Antriebsring besonders bevorzugt ausschließlich über die zweiten Torsionsfederelemente mit dem Rahmenelement verbunden sein kann.

[0025] Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist das Spiegelement einen Spiegelbereich und einen den Spiegelbereich umgebenden Randbereich auf, der bevorzugt mittels zumindest eines Durchbruchs teilweise vom Spiegelbereich getrennt ist. Das Spiegelement kann besonders bevorzugt kreisrund sein, so dass der zumindest eine Durchbruch die Form eines Kreisbogens haben kann. Besonders bevorzugt können zwei Durchbrüche vorhanden sein, die sich gegenüber liegen und die beide die Form eines Kreisbogens haben.

[0026] Weiterhin kann der Spiegelbereich auch elliptisch sein und eine größere Ellipsenachse und kleinere Ellipsenachse aufweisen. Bevorzugt sind die größere Ellipsenachse entlang der ersten Richtung und die kleinere Ellipsenachsen entlang der zweiten Richtung orientiert. Alternativ hierzu können die größere Ellipsenachse entlang der zweiten Richtung und die kleinere Ellipsenachse entlang der ersten Richtung orientiert sein. Die Durchbrüche weisen im Fall eines elliptischen Spiegelbereichs die Form von Ellipsenbögen auf. Das Verhältnis der größeren Ellipsenachse zur kleineren Ellipsenachse kann bevorzugt größer als 1 oder größer oder gleich 1,02 oder größer oder gleich 1,04 oder größer oder gleich 1,06 sowie kleiner oder gleich 1,1 oder kleiner oder gleich 1,08 oder kleiner oder gleich 1,07 sein.

[0027] Der Randbereich kann über zwei Verbindungsbereiche mit dem Spiegelbereich verbunden sein. Mit anderen Worten können die zwei Durchbrüche durch die zwei Verbindungsbereiche voneinander getrennt sein. Besonders bevorzugt sind die Verbindungsbereiche entlang der zweiten Richtung an zwei gegenüber liegenden Seiten des Spiegelbereichs angeordnet, so dass sich bevorzugt die zwei Durchbrüche entlang der ersten Richtung gegenüber liegen können.

[0028] Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist auf dem Spiegelbereich eine reflektierende Beschichtung aufgebracht. Beispielsweise kann die Beschichtung eine metallische Beschichtung sein. Weiterhin ist beispielsweise auch eine dielektrische Beschichtung, etwa ein Bragg-Spiegel, möglich.

[0029] Der Randbereich und die Verbindungsbereiche können bevorzugt frei von der reflektierenden Beschichtung sein.

[0030] Gemäß einer weiteren Ausführungsform umgibt das Rahmenelement den Antriebsring. Das Rahmenelement kann insbesondere eine das Rahmenelement durchdringende Aussparung aufweisen, in der das zumindest eine zweite Torsionsfederelement und der Antriebsring mit dem im Antriebsring angeordneten zumindest einen ersten Torsionsfederelement und Spiegelement angeordnet sind. Das zumindest eine zweite Torsionsfederelement ragt besonders bevorzugt aus der die Aussparung umgebenden Randfläche und damit aus dem Rahmenelement in die Aussparung hinein. Die Aussparung weist bevorzugt eine polygonale Grundform auf, die beispielsweise viereckig, sechseckig oder achteckig sein kann. Weiterhin kann es möglich sein, dass die Aussparung entlang der ersten und zweiten Richtung eine gleiche Ausdehnung aufweist. Weist das Rahmenelement einen Aktuationsbereich auf, kann dieser unmittelbar an die Aussparung angrenzen. Weiterhin kann der Aktuationsbereich mittels zumindest eines Durchbruchs teilweise vom Randteil getrennt sein.

[0031] Gemäß einer weiteren Ausführungsform weisen das Spiegelement und der Antriebsring eine geringere Dicke als zumindest ein Rahmenteil des Rahmenelements auf. Hier und im Folgenden kann „Dicke“ insbesondere eine Ausdehnung entlang einer dritten Richtung bedeuten, die senkrecht zur ersten und zweiten Richtung steht. Weist das Rahmenelement einen Aktuationsbereich auf, kann bevorzugt auch der Aktuationsbereich eine geringere Dicke als der Rah-

menteil des Rahmenelements aufweisen.

[0032] Besonders bevorzugt sind das Rahmenelement, der Antriebsring, das Spiegelement und die Torsionsfederelemente einstückig ausgebildet. Insbesondere können das Rahmenelement, der Antriebsring, das Spiegelement und die Torsionsfederelemente Silizium aufweisen. Zur Herstellung des Spiegelbauelements kann ein Träger, beispielsweise in Form eines Siliziumwafers oder eines SOI-Wafers (SOI: „silicon on insulator“, Silizium auf einem Isolator), bereitgestellt werden, der zur Ausbildung des Rahmenelements, des Antriebsrings, des Spiegelements und der Torsionsfederelemente entsprechend strukturiert wird. Auf den strukturierten Träger können dann die Elektroden und die piezoelektrische Schicht sowie je nach Ausgestaltung beispielsweise auch Isolatorschichten und/oder Leiterbahnen ausgebildet oder aufgebracht werden.

[0033] Gemäß einer weiteren Ausführungsform sind Maßnahmen vorgesehen, um eine Positionsbestimmung des Spiegelements und/oder eine Positionsbestimmung des Antriebsrings und/oder eine Frequenzbestimmung einer oder beider Torsionsschwingungen zu erreichen. Beispielsweise können während des Betriebs des piezoelektrischen Spiegelbauelements im ersten Wechselstromsignal die zweite Frequenz und im zweiten Wechselstromsignal die erste Frequenz gemessen werden. Dies kann beispielsweise durch Verwendung geeigneter Frequenzfilter in den Antriebszuleitungen erreicht werden, so dass keine zusätzlichen Leitungen nötig sind. Weiterhin kann es auch möglich sein, dritte Ansteuerbereiche vorzusehen, in denen ein piezoelektrisches Signal über den piezoelektrischen Effekt gemessen wird. Die dritten Ansteuerbereiche können insbesondere an geeigneten Positionen vorgesehen sein, so dass ein gutes Signal erzielt werden kann.

[0034] Weiterhin können zur Positions- und/oder Frequenzmessung zumindest zwei Elektroden-elemente vorhanden sein, die einen Kondensator bilden, der bei einer Bewegung des Spiegelements, insbesondere relativ zum Antriebsring, oder des Antriebsrings, insbesondere relativ zum Rahmenelement, eine variable Kapazität aufweist, wobei die Kapazität des Kondensators gemessen wird. Bei einer solchen kapazitiven Messung kann insbesondere auch der Nulldurchgang des Antriebsrings und/oder des Spiegelements ermittelt werden. Um einen kapazitiven Kurzschluss zu vermeiden, kann die erste Elektrode geeignet strukturiert sein.

[0035] Die Elektroden-elemente können beispielsweise durch Leiterbahnteile gebildet werden. Ein erstes Elektroden-element kann beispielsweise auf dem Rahmenelement angeordnet sein, während ein zweites Elektroden-element auf dem Antriebsring benachbart zum ersten Elektroden-element angeordnet ist. Bei einer Bewegung des Antriebsrings relativ zum Rahmenelement kann sich der Abstand zwischen den Elektroden-elementen ändern, wodurch sich die Kapazität des durch die Elektroden-elemente gebildeten Kondensators ändern kann. Entsprechend können beispielsweise Elektroden-elemente auf dem Antriebsring und dem Spiegelement angeordnet werden. Es kann auch möglich sein, beispielsweise zwei Elektroden-elemente auf dem Rahmenelement auf gegenüber liegenden Seiten des Antriebsrings anzuordnen, so dass sich der Antriebsring zwischen den zwei auf dem Rahmenelement angeordneten Elektroden-elementen befindet. Der Antriebsring kann dann bei einer Bewegung wie ein sich bewegendes Dielektrikum zwischen den Elektroden-elementen wirken, wodurch sich die Kapazität des dadurch gebildeten Kondensators ändern kann. Entsprechend können auch zwei Elektroden-elemente auf gegenüber liegenden Seiten des Spiegelements auf dem Antriebsring angeordnet sein.

[0036] Weiterhin kann es auch möglich sein, dass erste und/oder zweite Ansteuerbereiche vorhanden sind, die in einem Zeitmultiplexverfahren wechselweise zum Antrieb des Spiegelements oder des Antriebsrings und zur Messung eines piezoelektrischen Signals verwendet werden.

[0037] Weitere Vorteile, vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen ergeben sich aus den im Folgenden in Verbindung mit den Figuren beschriebenen Ausführungsbeispielen.

[0038] Figuren 1A und 1B zeigen schematische Darstellungen eines piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß einem Ausführungsbeispiel,

[0039] Figuren 2A bis 2E zeigen schematische Darstellungen von Verfahrensschritten eines Verfahrens zur Herstellung des piezoelektrischen Spiegel-

- bauelements gemäß der Figuren 1A und 1B,
- [0040]** Figuren 3A und 3B zeigen schematische Darstellungen von Verfahrensschritten eines Verfahrens zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß der Figuren 1A und 1B,
- [0041]** Figuren 4A bis 5E zeigen Simulationsuntersuchungen zum piezoelektrischen Spiegelbauelement gemäß der Figuren 1A und 1B,
- [0042]** Figuren 6A und 6B zeigen schematische Darstellungen eines piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel,
- [0043]** Figuren 7A bis 7E zeigen schematische Darstellungen von Verfahrensschritten eines Verfahrens zur Herstellung des piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß der Figuren 6A und 6B,
- [0044]** Figuren 8A bis 8E zeigen schematische Darstellungen von Verfahrensschritten eines Verfahrens zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß der Figuren 6A und 6B,
- [0045]** Figuren 9A bis 12E zeigen Simulationsuntersuchungen zum piezoelektrischen Spiegelbauelement gemäß der Figuren 6A und 6B,
- [0046]** Figuren 13A und 13B zeigen schematische Darstellungen eines piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel,
- [0047]** Figuren 14A bis 14E zeigen schematische Darstellungen von Verfahrensschritten eines Verfahrens zur Herstellung des piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß der Figuren 13A und 13B,
- [0048]** Figur 15 zeigt eine schematische Darstellung eines Verfahrensschritts eines Verfahrens zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß der Figuren 13A und 13B,
- [0049]** Figuren 16A bis 16E zeigen Simulationsuntersuchungen zum piezoelektrischen Spiegelbauelement gemäß der Figuren 13A und 13B,
- [0050]** Figur 17 zeigt eine schematische Darstellung einer Projektionsvorrichtung gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel,
- [0051]** Figuren 18A bis 18E zeigen schematische Darstellungen von Maßnahmen zur Positions- und/oder Frequenzbestimmung von Komponenten eines piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß einigen Ausführungsbeispielen,
- [0052]** Figuren 19A und 19B zeigen schematische Teildarstellungen eines piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß weiteren Ausführungsbeispielen.

[0053] In den Ausführungsbeispielen und Figuren können gleiche, gleichartige oder gleich wirkende Elemente jeweils mit denselben Bezugszeichen versehen sein. Die dargestellten Elemente und deren Größenverhältnisse untereinander sind nicht als maßstabsgerecht anzusehen, vielmehr können einzelne Elemente, wie zum Beispiel Schichten, Bauteile, Bauelemente und Bereiche, zur besseren Darstellbarkeit und/oder zum besseren Verständnis übertrieben groß dargestellt sein.

[0054] In den Figuren 1A und 1B sind schematische Darstellungen eines piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel gezeigt, wobei in Figur 1A eine dreidimensionale Ansicht auf eine Oberseite des Spiegelbauelements 100 und in Figur 1B eine dreidimensionale Ansicht auf eine Unterseite des Spiegelbauelements 100 gezeigt sind. Die Figuren 2A bis 2E zeigen in Ansichten auf die Oberseite schematische Darstellungen von Verfahrensschritten eines Verfahrens zur Herstellung des piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 ge-

mäß der Figuren 1A und 1B. Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich gleichermaßen auf die Figuren 1A und 1B und die Figuren 2A bis 2E.

[0055] Das piezoelektrische Spiegelbauelement 100 weist ein Spiegelement 10, einen piezoelektrischen Antriebsring 20 und ein Rahmenelement 30 auf. Der Antriebsring 20 umgibt das Spiegelement 10 und ist über zumindest ein erstes Torsionsfederelement 41 mit dem Spiegelement 10 verbunden. Das Rahmenelement ist über zumindest ein zweites Torsionsfederelement 42 mit dem Antriebsring verbunden. Das Spiegelement 10, der Antriebsring 20 und das Rahmenelement 30 sowie die Torsionsfederelemente 41, 42 sind in einem Ruhezustand des Spiegelbauelements 100 entlang einer Ebene ausgerichtet, die durch eine erste Richtung, in den Figuren mit „x“ bezeichnet, und eine zur ersten Richtung senkrecht stehende zweite Richtung, in den Figuren mit „y“ bezeichnet, aufgespannt wird. Zumindest auf dem Antriebsring 20 ist eine piezoelektrische Schicht 50 aufgebracht, die zwischen einer ersten Elektrode 51 und einer zweiten Elektrode 52 angeordnet ist. Die piezoelektrische Schicht 50 weist bevorzugt ein piezoelektrisches Material basierend auf Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) auf oder ist daraus.

[0056] Zur Herstellung des Spiegelbauelements 100 wird, wie in Figur 2A angedeutet ist, ein Träger 101, beispielsweise in Form eines Siliziumwafers oder in Form eines SOI-Wafers mit einem Trägermaterial aus einem elektrisch isolierenden Material und darauf einer Siliziumschicht, bereitgestellt. In einem Bereich 102, in dem das Spiegelement 10, der piezoelektrische Antriebsring 20, das Rahmenelement 30 und die Torsionsfederelemente 41, 42 angeordnet sind, also in dem Bereich, in dem das Spiegelbauelement 100 mechanisch aktiv ist, wird der Träger 101 von der Unterseite her gedünnt. Zur Ausbildung des Spiegelements 10, des Antriebsrings 20, und der Torsionsfederelemente 41, 42 im Bereich 102 wird der Träger, wie in Figur 2B gezeigt ist, durchgeätzt und damit strukturiert, so dass im Rahmenelement 30, das den Antriebsring 20 umgibt, eine Aussparung 31 erzeugt wird, in der das Spiegelement 10, der piezoelektrische Antriebsring 20, das Rahmenelement 30 und die Torsionsfederelemente 41, 42 angeordnet sind. Das Rahmenelement 30, der Antriebsring 20, das Spiegelement 10 und die Torsionsfederelemente 41, 42 sind somit einstückig ausgebildet. Die Aussparung 31 weist bevorzugt eine polygonale Grundform auf, die wie gezeigt achteckig sein kann. Weiterhin kann es möglich sein, dass die Aussparung 31 entlang der ersten und zweiten Richtung eine gleiche Ausdehnung aufweist.

[0057] Wie in den Figuren 1A und 1B weiterhin zu erkennen ist, weisen das Spiegelement 10 und der Antriebsring 20 sowie die Torsionsfederelemente 41, 42 durch das vorab beschriebene Dünnen des Trägers 101 eine geringere Dicke als das Rahmenelement 30 auf, wobei die Dicke in einer in den Figuren mit „z“ bezeichneten dritten Richtung, die auf der ersten und zweiten Richtung senkrecht steht, gemessen wird. Auf der Oberseite des Trägers 101 kann, falls erforderlich, eine elektrisch isolierende Schicht aufgebracht oder ausgebildet werden, beispielsweise mit oder aus Siliziumoxid oder Siliziumnitrid.

[0058] Wie gezeigt ist der Antriebsring 20 über zwei erste Torsionsfederelemente 41 mit dem Spiegelement 10 verbunden, die entlang einer Geraden entlang der ersten Richtung an zwei gegenüber liegenden Seiten des Spiegelements 10 angeordnet sind. Weiterhin ist der Antriebsring 20 über zwei zweite Torsionsfederelemente 42 mit dem Rahmenelement 30 verbunden, die entlang einer Geraden entlang der zweiten Richtung an zwei gegenüber liegenden Seiten des Antriebsrings 20 angeordnet sind. Damit ist die Aufhängung des Spiegelements 10 am Antriebsring 20 um 90° gedreht zur Aufhängung des Antriebsrings 20 am Rahmenelement 30.

[0059] Das Spiegelement 10 weist einen Spiegelbereich 11 und einen den Spiegelbereich 11 umgebenden Randbereich 12 auf, der durch zwei Durchbrüche 13, die im Rahmen der vorab beschriebenen Ausbildung des Spiegelements 10 durch Ätzen erzeugt werden, teilweise vom Spiegelbereich 11 getrennt und bevorzugt damit mechanisch zumindest teilweise entkoppelt ist. Das Spiegelement 10 und der Spiegelbereich 11 weisen wie gezeigt bevorzugt eine kreisrunde Grundform auf, so dass die Durchbrüche 13 die Form von Kreisbögen aufweisen. Die zwei Durchbrüche 13 sind sich entlang der ersten Richtung gegenüber liegend ausgebildet. Der Randbereich 12 ist über zwei Verbindungsbereiche 14 mit dem Spiegelbereich 11 verbunden, so dass die zwei Durchbrüche 13 durch die zwei Verbindungsbereiche 14, die entlang der zweiten Richtung an

zwei gegenüber liegenden Seiten des Spiegelbereichs 11 angeordnet sind, voneinander getrennt sind und so dass die Verbindungsbereiche um 90° gedreht zu den ersten Torsionsfederelementen 41 ausgerichtet sind.

[0060] Auf dem Antriebsring 20, den zweiten Torsionsfederelementen 42 und teilweise auf dem Rahmenelement 30 werden zusammenhängend die erste Elektrode 51 und die piezoelektrische Schicht 50 aufgebracht, wie in den Figuren 2C und 2D zu erkennen ist. Damit der Teil der ersten Elektrode 51 auf dem Antriebsring 20 über den Teil der ersten Elektrode 51 auf dem Rahmenelement 30 von außen kontaktiert werden kann, werden Kontaktelemente 53 in Form von Aussparungen in der piezoelektrischen Schicht 50 vorgesehen, wie in Figur 2D angedeutet ist.

[0061] Auf der piezoelektrischen Schicht 50 wird, wie in Figur 2E gezeigt ist, auf dem Antriebsring 20 die zweite Elektrode 52 aufgebracht. Die zweite Elektrode 52 ist in eine Mehrzahl von Ansteuerbereichen strukturiert, die, wie weiter unten erläutert ist, zumindest in erste und zweite Ansteuerbereiche eingeteilt werden können, so dass die zweite Elektrode 52 eine Mehrzahl von voneinander unabhängig ansteuerbaren Bereichen aufweist. Zur elektrischen Kontaktierung der Ansteuerbereiche der zweiten Elektrode 52 werden auf dem Rahmenelement 30 weitere Kontaktbereiche 53 aufgebracht, die über Leiterbahnen 54, die ebenfalls auf der piezoelektrischen Schicht 50 aufgebracht werden, mit den Antriebsbereichen elektrisch leitend verbunden sind.

[0062] Weiterhin wird, wie ebenfalls in Figur 2E zu erkennen ist, auf dem Spiegelbereich 11 eine reflektierende Beschichtung 15 aufgebracht, die bevorzugt eine metallische Beschichtung ist. Weiterhin ist beispielsweise auch eine dielektrische Beschichtung, etwa ein Bragg-Spiegel, möglich. Der Randbereich 12 und die Verbindungsbereiche 13 bleiben frei von der reflektierenden Beschichtung 15.

[0063] Die ersten Torsionsfederelemente 41 und die zweiten Torsionsfederelemente 42 sind als sogenannte Torsionsbalken ausgebildet und weisen eine länglichen Form mit einer Längsrichtung auf, die entlang der ersten Richtung im Fall der ersten Torsionsfederelemente 41 und entlang der zweiten Richtung im Fall der zweiten Torsionsfederelemente 42 verläuft. Im Betrieb des Spiegelbauelements 100 können die Torsionsfederelemente 41, 42 jeweils eine Torsionsbewegung um eine Drehachse ausführen, wobei die Drehachse bevorzugt im Wesentlichen der Längsrichtung des jeweiligen Torsionsfederelements 41, 42 entspricht. Wird das Spiegelelement 10 relativ zum Antriebsring 20 um die durch die ersten Torsionsfederelemente 41 definierte erste Drehachse verdreht, können die ersten Torsionsfederelemente 41 bevorzugt eine linear vom Drehwinkel abhängige Rückstellkraft auf das Spiegelelement 10 ausüben. Wird der Antriebsring 20 und damit auch das Spiegelelement 10 relativ zum Rahmenelement 30 um die durch die zweiten Torsionsfederelemente 42 definierte zweite Drehachse verdreht, können die zweiten Torsionsfederelemente 42 bevorzugt eine linear vom Drehwinkel abhängige Rückstellkraft auf den Antriebsring 20 ausüben.

[0064] Auf dem Antriebsring 20 bilden die erste Elektrode 51, die piezoelektrische Schicht 50 und jeder der Ansteuerbereiche der zweiten Elektrode 52 voneinander unabhängig ansteuerbare piezoelektrische Elemente. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der ersten Elektrode 51 und zumindest einem Ansteuerbereich der zweiten Elektrode 52 kann über den inversen Piezoeffekt eine mechanische Verformung der piezoelektrischen Schicht 50 und damit des Antriebsrings 20 in einem Teilbereich erreicht werden, wodurch auf den Antriebsring 20 und/oder das Spiegelelement 10 eine Kraft ausgeübt werden kann. Durch Anlegen eines Wechselstromsignals mit einer oszillierenden elektrischen Spannung kann eine oszillierende Kraft ausgeübt werden, die eine oszillierende Verformung bewirken kann. Dadurch kann zumindest ein Teil des Spiegelbauelements 100 in Schwingungen versetzt werden. Die Figuren 3A und 3B zeigen hierzu schematische Darstellungen Ansteuerschemata für Verfahrensschritte eines Verfahrens zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 gemäß der Figuren 1A und 1B. Der Übersichtlichkeit halber sind in den Figuren 3A und 3B nur die Ansteuerbereiche der zweiten Elektrode mit Bezugszeichen versehen. Im Folgenden genannte, nicht in den Figuren 3A und 3B gezeigte Bezugszeichen beziehen sich auf die Figuren 1A bis 2E.

[0065] Durch eine Ansteuerung der in Figur 3A gekennzeichneten ersten Ansteuerbereiche 521

mit einem ersten Wechselstromsignal mit einer ersten Frequenz und der ersten Ansteuerbereiche 521' mit dem ersten Wechselstromsignal mit der ersten Frequenz, aber einer um 180° verschobenen Phasenlage, kann das Spiegelement 10 in einer ersten Torsionsschwingung relativ zum Antriebsring 20 um die durch die ersten Torsionsfederelemente 41 gebildete erste Drehachse versetzt werden. Durch eine Ansteuerung der in Figur 3B gekennzeichneten zweiten Ansteuerbereiche 522 mit einem zweiten Wechselstromsignal mit einer zweiten Frequenz und der zweiten Ansteuerbereiche 522' mit dem zweiten Wechselstromsignal mit der zweiten Frequenz, aber einer um 180° verschobenen Phasenlage, kann der Antriebsring 20 und damit auch das Spiegelement 10 in einer zweiten Torsionsschwingung relativ zum Rahmenelement 30 um die durch die zweiten Torsionsfederelemente 42 gebildete zweite Drehachse versetzt werden.

[0066] Insbesondere erfolgt die Ansteuerung mit dem ersten Wechselstromsignal und die Ansteuerung mit dem zweiten Wechselstromsignal gleichzeitig, so dass das Spiegelement 10 und der Antriebsring 20 die besagten Torsionsschwingungen gleichzeitig ausführen, so dass das Spiegelement 10 relativ zum Antriebsring 20 um die erste Drehachse mit der ersten Frequenz oszilliert und gleichzeitig der Antriebsring 20 zusammen mit dem Spiegelement 10 relativ zum Rahmenelement 30 um die zweite Drehachse mit der zweiten Frequenz oszilliert. Die erste Frequenz und die zweite Frequenz können besonders bevorzugt Resonanzfrequenzen der Torsionsschwingungen sein oder zumindest nahe bei einer jeweiligen Resonanzfrequenz liegen, die abhängig von den geometrischen Ausgestaltungen der Elemente des Spiegelbauelements sind. Besonders bevorzugt sind die erste Frequenz und die zweite Frequenz unterschiedlich. Durch die um 90° gedrehte Anordnung der ersten Drehachse zur zweiten Drehachse können die erste und zweite Torsionsschwingung bevorzugt mechanisch entkoppelt sein.

[0067] Unterschiedliche Resonanzfrequenzen können insbesondere durch die gezeigte nicht-kreisrunde Ausgestaltung des Antriebsrings 40 sowie durch die Tatsache erreicht werden, dass die erste Torsionsschwingung nur durch das Spiegelement 10 ausgeführt wird, während die zweite Torsionsschwingung durch den Antriebsring 20 zusammen mit dem Spiegelement 10 ausgeführt wird. Der Antriebsring 20 weist, wie in den Figuren 1A bis 2E zu erkennen ist, einen ersten Durchmesser entlang der ersten Richtung und einen zweiten Durchmesser entlang der zweiten Richtung auf, wobei der erste Durchmesser verschieden zum zweiten Durchmesser ist. Insbesondere ist der erste Durchmesser im gezeigten Ausführungsbeispiel größer als der zweite Durchmesser. Besonders bevorzugt weist der Antriebsring 20 wie gezeigt eine elliptische Form oder zumindest eine an eine elliptische Form angenäherte Form auf.

[0068] Der Antriebsring 20 wird durch einen inneren Rand, der dem Spiegelement 10 zugewandt ist, und einen gegenüber liegenden äußeren Rand in Richtungen entlang der durch die erste und zweite Richtung aufgespannte Ebene begrenzt, wobei der innere und der äußere Rand jeweils eine elliptische Form aufweisen oder zumindest an eine elliptische Form angenähert sein können. Die Form des äußeren Rands kann durch den vorab erwähnten ersten und zweiten Durchmesser definiert sein, die somit ein erster und zweiter Außendurchmesser des Antriebsrings 20 sind. Der innere Rand weist ebenfalls einen ersten und einen zweiten Durchmesser auf, die somit ein erster und zweiter Innendurchmesser des Antriebsrings 20 sind, wobei der erste Innendurchmesser entlang der ersten Richtung und der zweite Innendurchmesser entlang der zweiten Richtung verläuft. Das Verhältnis des ersten Außendurchmessers zum zweiten Außendurchmesser kann gleich oder unterschiedlich zum Verhältnis des ersten Innendurchmessers zum zweiten Innendurchmesser sein. Sind die Verhältnisse unterschiedlich, so kann wie gezeigt der Antriebsring 20 entlang der ersten Richtung eine erste Breite und entlang der zweiten Richtung eine zweite Breite aufweisen, wobei die erste Breite verschieden von der zweiten Breite ist. Beispielsweise kann die erste Breite wie gezeigt kleiner als die zweite Breite sein.

[0069] In den Figuren 4A bis 5E sind Simulationsuntersuchungen zum piezoelektrischen Spiegelbauelement 100 gemäß der vorher beschriebenen Figuren gezeigt.

[0070] Hierfür wurden die folgenden bevorzugten Parameter für das Spiegelbauelement angenommen:

- Durchmesser des Spiegelements: 1,7 mm

- Erster Außendurchmesser des Antriebsrings 20, d.h. größerer Außendurchmesser: 5,7 mm
- Abstand der am Rahmenelement 30 angrenzenden Enden der zweiten Torsionsfederelemente 42: 6,4 mm
- Dicke der beweglichen Teile des piezoelektrischen Spiegelbauelements, also der Elemente innerhalb der Aussparung 31: 175 μm
- Dicke der piezoelektrischen Schicht: 1 μm
- angenommene Dämpfung: 10^{-4}
- Spannung der Wechselstromsignale: $\pm 2 \text{ V}$
- quadratischer Querschnitt der Torsionsfederelemente 41, 42, d.h. Dicke gleich Breite
- Vernachlässigung des ESR („equivalent series resistance“, äquivalenter Serienwiderstand)

[0071] In den Figuren 4A und 4B ist in einer dreidimensionalen Ansicht und in einer seitlichen Ansicht entlang der ersten Richtung eine relative Verdrehung des Spiegelements 10 zum Antriebsrings 20 aufgrund der in Verbindung mit der Figur 3A beschriebenen Ansteuerung für die erste Torsionsschwingung gezeigt.

[0072] In Figur 4C sind Diagramme für Simulationen zur Untersuchung der mechanischen Performance (oberes Diagramm) und der elektrischen Performance (unteres Diagramm) in Abhängigkeit von der ersten Frequenz des angelegten ersten Wechselstromsignals gezeigt. Für die mechanische Performance wurden der mechanische halbe Scanwinkel, also der durch die Torsionsschwingung maximal erreichbare Drehwinkel des Spiegelements nach einer Seite aus der Neutralstellung, und die Phasenverzögerung zwischen dem anregenden ersten Wechselstromsignal und der Schwingungsbewegung des Spiegelements untersucht. Für die elektrische Performance wurden der Betrag und die Phase des komplexen Widerstands untersucht. In den Graphen ist mittels der Pfeile angedeutet, welche vertikale Achse sich auf welche Kurve bezieht. Wie aus den Diagrammen ersichtlich ist, liegt die Resonanzfrequenz der ersten Torsionsschwingung bei 28,4 kHz. Die Diagramme deuten auf eine rein harmonische Schwingung und somit auf eine reine Torsionsschwingungsmoden hin ohne wesentliches nicht-lineares Verhalten, und es zeigt sich insbesondere kein Hysterese-Verhalten. Der Antriebsring weist eine lediglich sehr geringe, insbesondere vernachlässigbare, Bewegung auf. Das auf Resonanz erreichbare optische Blickfeld (FoV, „field of view“) für die gewählten Parameter liegt bei etwa 60° , was einem mechanischen halben Scanwinkel von etwa 15° entspricht. Durch ein leichtes Detuning der ersten Frequenz von der Resonanzfrequenz kann gegebenenfalls eine Reduktion des FoV erreicht werden.

[0073] In den Figuren 4D und 4E sind, basierend auf Simulationen, die Verwindung der Oberfläche des Spiegelements, angedeutet durch einen Versatz in Mikrometer, und die mechanische Belastung des Spiegelbauelements in GPa bei der ersten Torsionsschwingung mit der Resonanzfrequenz gezeigt. Die Verwindung der Spiegelfläche während der Schwingung liegt im Bereich von $\pm 250 \text{ nm}$, wobei die höchsten Werte lediglich in der Nähe der Verbindungsbereiche auftreten. Die Belastung für ein FoV von 60° auf Resonanz erreicht maximale Werte von etwa 2,5 GPa in den ersten Torsionsfederelementen. Derartige Werte sind für Silizium vertretbar. Durch Reduzierung des FoV, beispielsweise um ein Drittel auf etwa 40° , können die Verwindung und die Belastung weiter gesenkt werden, da die Größe beider Effekte proportional zum Scanwinkel sind.

[0074] In den Figuren 5A bis 5E sind, entsprechend den Figuren 4A bis 4E, Ergebnisse aus Simulationen für die in Verbindung mit der Figur 3B beschriebene Ansteuerung für die zweite Torsionsschwingung gezeigt, wobei in Figur 5B im Vergleich zur Figur 4B eine Ansicht entlang der zweiten Richtung gezeigt ist. Für die zweite Torsionsschwingung ergibt sich eine Resonanzfrequenz von 5,85 kHz, wobei die zweite Torsionsschwingung ebenfalls eine reine Torsionsschwingungsmoden um die zweiten Torsionsfederelemente ohne Hysterese-Verhalten ist. Der Antriebsring bewegt sich hierbei zusammen mit dem Spiegelement, so dass eine Ablenkung eines Laserstrahls erreicht werden kann, die zur in Verbindung mit den Figuren 4A bis 4E beschriebenen Ablenkung senkrecht steht, so dass mittels der ersten und zweiten Torsionsschwingung ein Lis-

sajous-Scanning möglich ist. Das erreichbare FoV beträgt bei den gewählten Parametern 36° , was einem mechanischen halben Scanwinkel von 9° entspricht. Die Verwindung der Spiegelfläche während der Schwingung liegt im Bereich von ± 50 nm, wobei die höchsten Werte lediglich in den Randbereichen des Spiegelements und nicht auf der Spiegelfläche auftreten. Die Belastung für ein FoV von 36° auf Resonanz erreicht maximale Werte von etwa 1,5 GPa in den zweiten Torsionsfederelementen. Derartige Werte sind in einem akzeptablen Bereich für Silizium, so dass für die zweite Torsionsschwingung ein FoV von 36° möglich ist.

[0075] In der folgenden Tabelle 1 sind die Ergebnisse der in Verbindung mit den Figuren 4A bis 5E diskutierten Simulationen noch einmal zusammengefasst:

Torsionsschwingung	erste (schnelle Mode)	zweite (langsame Mode)
Scanrichtung	y (d.h. parallel zur zweiten Richtung)	x (d.h. parallel zur ersten Richtung)
Resonanzfrequenz (kHz)	28, 4	5, 85
Field of View ($^\circ$)	60	36
Maximale Belastung (GPa)	2,5	1,5
Verwindung (nm)	± 250 nm	± 50 nm

Tabelle 1

[0076] Während also die ersten Torsionsfederelemente eine vergleichsweise schnelle reine Torsionsschwingungsmoden des Spiegelements ermöglichen, ermöglichen die zweiten Torsionsfederelemente eine im Vergleich dazu langsamere ebenfalls reine Torsionsschwingungsmoden des Antriebsrings zusammen mit dem Spiegelement. Beide Schwingen sind frei von nicht-linearem Verhalten und Hysterese.

[0077] In Verbindung mit den nachfolgenden Figuren sind weitere Ausführungsbeispiele beschrieben, die Modifikationen des in Verbindung mit den vorherigen Figuren erläuterten Spiegelbauelements darstellen. Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich daher im Wesentlichen auf die Unterschiede zur vorherigen Beschreibung.

[0078] In den Figuren 6A und 6B sind schematische Darstellungen eines piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel gezeigt, wobei die Ansichten in den Figuren 6A und 6B denen in den Figuren 1A und 1B entsprechen. Die Figuren 7A bis 7E zeigen schematische Darstellungen von Verfahrensschritten eines Verfahrens zur Herstellung des piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 gemäß der Figuren 6A und 6B, wobei die Ansichten der Figuren 7A bis 7E denen in den Figuren 2A bis 2E entsprechen. Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich gleichermaßen auf die Figuren 6A und 6B und die Figuren 7A bis 7E.

[0079] Im Vergleich zum in Verbindung mit den Figuren 1A bis 2E beschriebenen Spiegelbauelement weist das Spiegelbauelement 100 der Figuren 6A bis 7E zusätzlich auf dem Rahmenelement 30 einen Aktuationsbereich 33 des Rahmenelements 30 auf, der von einem Randteil 32 des Rahmenelements 30 umgeben ist. Der Aktuationsbereich 33 grenzt unmittelbar an die Aussparung 31 an, die wie gezeigt beispielsweise sechseckig sein kann, und weist wie die beweglichen Komponenten des Spiegelbauelements 100, die in der Aussparung 31 angeordnet sind, eine geringere Dicke als der Randteil 31 auf. Weiterhin wird der Aktuationsbereich 33 mittels mehrerer Durchbrüche 34 teilweise vom Randteil 32 getrennt.

[0080] Die zweite Elektrode 52 ist zusätzlich zum Antriebsring 20 auch auf dem Rahmenelement 30 im Aktuationsbereich 33 aufgebracht und in eine Mehrzahl von Ansteuerbereichen strukturiert.

Dadurch können zusätzlich zu den Ansteuerbereichen auf dem Antriebsring 20 weitere Ansteuerbereiche auf dem Rahmenelement 30 vorgesehen werden, durch die bei einer geeigneten Ansteuerung, die weiter unten beschrieben wird, eine Kraft insbesondere auf den Antriebsring 20 ausgeübt werden kann. Durch die gezeigte größere Bauform mit dem zusätzlichen Aktuationsbereich 33 kann somit im Vergleich zum vorherigen Ausführungsbeispiel ein zusätzlicher oder alternativer Antrieb für die zweite Torsionsschwingung des Antriebsrings 20 ermöglicht werden.

[0081] Wie in Figur 7A gezeigt ist, wird zur Herstellung des in den Figuren 6A und 6B gezeigten Spiegelbauelements 100 ein größerer Bereich 102 des Trägers 101 von der Unterseite her gedünnt. Der Bereich 102 entspricht dabei dem Bereich, in dem das Spiegelement 10, der piezoelektrische Antriebsring 20, das Rahmenelement 30, die Torsionsfederelemente 41, 42 sowie der Aktuationsbereich 33 angeordnet sind. Zur Ausbildung des Spiegelements 10, des Antriebsrings 20, der Torsionsfederelemente 41, 42 und des Aktuationsbereich 33 im Bereich 102 wird der Träger, wie in Figur 7B gezeigt ist, durchgeätzt und strukturiert, so dass im Rahmenelement 30 zusätzlich zu den Komponenten in der Aussparung 31 die Durchbrüche 34 erzeugt werden. Der nicht-gedünnte Teil des Rahmenelements 30, der das Spiegelement 10, den piezoelektrischen Antriebsring 20, die Torsionsfederelemente 41, 42, den Aktuationsbereich 33 und die Durchbrüche 34 umgibt, bildet den Randteil 32, wobei alle genannten Komponenten einstückig ausgebildet sind. Die in den Figuren 7C bis 7E gezeigten Verfahrensschritte entsprechen den in Verbindung mit den Figuren 2C bis 2E beschriebenen Verfahrensschritten, wobei die erste Elektrode 51, die piezoelektrische Schicht 50 und die zweite Elektrode 52 zur Ausbildung von zusätzlichen piezoelektrischen Elementen auch im Aktuationsbereich 33 des Rahmenelements 30 aufgebracht werden. Die Kontaktelemente 53 sind vom Aktuationsbereich 33 durch die Durchbrüche 34 getrennt und sind auf dem Randteil 32 angeordnet. Dadurch sind die Kontaktelemente 53 vom Aktuationsbereich 33 mechanisch zumindest teilweise entkoppelt.

[0082] Wie in Verbindung mit den Figuren 3A und 3B erläutert, bilden die erste Elektrode 51, die piezoelektrische Schicht 50 und jeder der Ansteuerbereiche der zweiten Elektrode 52 auf dem Antriebsring 20 und dem Rahmenelement 30 voneinander unabhängig ansteuerbare piezoelektrische Elemente. In den Figuren 8A bis 8E sind schematische Darstellungen von beispielhafte Ansteuerschemata über erste und zweite Ansteuerbereiche 521, 521', 522, 522' für ein Verfahren zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 gemäß der Figuren 6A bis 7E gezeigt.

[0083] In den Figuren 8A bis 8C sind erste Ansteuerbereiche 521 und 521' gekennzeichnet, wobei die ersten Ansteuerbereiche 521 mit einem ersten Wechselstromsignal mit einer ersten Frequenz und die ersten Ansteuerbereiche 521' mit dem ersten Wechselstromsignal mit der ersten Frequenz, aber einer um 180° verschobenen Phasenlage, angesteuert werden, um das Spiegelement 10 in eine erste Torsionsschwingung relativ zum Antriebsring 20 um die durch die ersten Torsionsfederelemente 41 gebildete erste Drehachse zu versetzen. In den Figuren 8D und 8E sind entsprechend zweite Ansteuerbereiche 522 und 522' gekennzeichnet, wobei die zweiten Ansteuerbereiche 522 mit einem zweiten Wechselstromsignal mit einer zweiten Frequenz und die zweiten Ansteuerbereiche 521' mit dem zweiten Wechselstromsignal mit der zweiten Frequenz, aber einer um 180° verschobenen Phasenlage, angesteuert werden, um den Antriebsring 20 zusammen mit dem Spiegelement 10 in eine zweite Torsionsschwingung relativ zum Rahmenelement 30 um die durch die zweiten Torsionsfederelemente 42 gebildete zweite Drehachse zu versetzen. Hierbei können insbesondere das Ansteuerschema der Figur 8A in Kombination mit dem Ansteuerschema der Figur 8D sowie eines der Ansteuerschemata der Figuren 8B und 8C in Kombination mit dem Ansteuerschema der Figur 8E verwendet werden, so dass die Ansteuerbereiche der zweiten Elektrode 52 eindeutig einer der beiden Torsionsschwingungen zugeordnet werden können.

[0084] In den Figuren 9A bis 12E sind Simulationsuntersuchungen wie die in Verbindung mit den Figuren 4A bis 5E erläuterten gezeigt, wobei zusätzlich zu den oben in Verbindung mit den Figuren 4A bis 5E angenommen bevorzugten Parametern die Abmessung des Spiegelbauelements einschließlich dem Rahmenelement mit etwa 11 x 8 mm² angenommen wurde. Alle Simulationsuntersuchungen ergaben reine Torsionsschwingungsmoden ohne Hysterese-Verhalten.

[0085] Die Figuren 9A bis 9E beziehen sich auf die in Figur 8A gezeigte Ansteuerung zur Erzeugung der ersten Torsionsschwingung. Für diese ergeben sich eine Resonanzfrequenz von 24,39 kHz und ein FoV von etwa 42°, was einem mechanischen halben Scanwinkel von etwa 10,7° entspricht. Die Verwindung des Spiegelbereichs während der Schwingung beträgt $\pm 23,8$ nm, die mechanische Belastung ist ausreichend gering.

[0086] Die Figuren 10A bis 10E beziehen sich auf die in Figur 8B gezeigte Ansteuerung zur Erzeugung der ersten Torsionsschwingung. Die Resonanzfrequenz, die durch die mechanischen Randbedingungen definiert ist, beträgt wie im Fall der Figur 8A 24,39 kHz, jedoch wird ein FoV von 48° erreicht, was einem mechanischen halben Scanwinkel von 12° entspricht. Die Verwindung der Spiegelfläche während der Schwingung beträgt $\pm 26,8$ nm, die mechanische Belastung ist ausreichend gering.

[0087] Die Figuren 11A bis 11E beziehen sich auf die in Figur 8D gezeigte Ansteuerung zur Erzeugung der zweiten Torsionsschwingung. Für diese ergeben sich eine Resonanzfrequenz von 4,88 kHz und ein FoV von etwa 75°, was einem mechanischen halben Scanwinkel von etwa 18,7° entspricht. Die Verwindung des Spiegelbereichs während der Schwingung beträgt $\pm 7,6$ nm, die mechanische Belastung ist ausreichend gering.

[0088] Die Figuren 12A bis 12E beziehen sich auf die in Figur 8E gezeigte Ansteuerung zur Erzeugung der zweiten Torsionsschwingung. Für diese ergeben sich wiederum eine Resonanzfrequenz von 4,88 kHz und ein FoV von etwa 45°, was einem mechanischen halben Scanwinkel von etwa 11,4° entspricht. Die Verwindung des Spiegelbereichs während der Schwingung beträgt $\pm 4,5$ nm, die mechanische Belastung ist ausreichend gering.

[0089] In den Figuren 13A und 13B sind schematische Darstellungen eines piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel gezeigt, das eine Modifikation des in Verbindung mit den Figuren 6A bis 7E beschriebenen Spiegelbauelements bildet. Die Figuren 14A bis 14E zeigen schematische Darstellungen von Verfahrensschritten eines Verfahrens zur Herstellung des piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 gemäß der Figuren 13A und 13B und entsprechen den in Verbindung mit den Figuren 7A bis 7E beschriebenen Verfahrensschritten. Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich gleichermaßen auf die Figuren 13A und 13B und die Figuren 14A bis 14E.

[0090] Im Vergleich zum Ausführungsbeispiel der Figuren 6A bis 7E weist das in den Figuren 13A bis 14E gezeigte Ausführungsbeispiel für das Spiegelbauelement 100 einen kleineren Aktuationsbereich 33 mit eher rechteckigen Formen auf. Die Aussparung 31 ist in diesem Ausführungsbeispiel viereckig und bevorzugt quadratisch ausgebildet.

[0091] In Figur 15 ist eine schematische Darstellungen eines beispielhaften Ansteuerschemas über zweite Ansteuerbereiche 522, 522' für ein Verfahren zum Betrieb des piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 gemäß der Figuren 13A bis 14E gezeigt, wobei die zweiten Ansteuerbereiche 522 mit einem zweiten Wechselstromsignal mit einer zweiten Frequenz und die zweiten Ansteuerbereiche 522' mit dem zweiten Wechselstromsignal mit der zweiten Frequenz, aber einer um 180° verschobenen Phasenlage, angesteuert werden, um den Antriebsring 20 zusammen mit dem Spiegelelement 10 in eine zweite Torsionsschwingung relativ zum Rahmenelement 30 um die durch die zweiten Torsionsfederelemente 42 gebildete zweite Drehachse zu versetzen. Zur Erzeugung der ersten Torsionsschwingung kann beispielsweise das in Figur 8A gezeigte Ansteuerschema verwendet werden.

[0092] In den Figuren 16A bis 16E sind Simulationsuntersuchungen wie die in Verbindung mit den Figuren 4A bis 5E erläuterten gezeigt, die sich auf die in Figur 15 angedeutete Ansteuerung beziehen. Die Simulationsuntersuchungen ergaben eine reine Torsionsschwingungsmoden ohne Hysterese-Verhalten für die untersuchte zweite Torsionsschwingung. Diese weist eine Resonanzfrequenz von 5,51 kHz und ein FoV von 67° auf, was einem mechanischen halben Scanwinkel von etwa 17,8° entspricht. Die Verwindung des Spiegelbereichs während der Schwingung beträgt $\pm 7,6$ nm, die mechanische Belastung ist ausreichend gering.

[0093] Das vorab gemäß einiger bevorzugter Ausführungsbeispiele beschriebene piezoelektri-

sche Spiegelbauelement weist Piezo-Dünnschichtelemente auf, mittels derer das Spiegelement in der ersten Richtung und in der zweiten Richtung jeweils resonant betrieben wird. Das Ergebnis ist ein sogenanntes Lissajous-Scanning. Dies ermöglicht im Vergleich zum Raster-Scanning eine höhere Bildauflösung bei gleicher Resonanzfrequenz für die schnelle Ablenkungsachse, also in den vorher beschriebenen Ausführungsbeispielen für die erste Drehachse. Folgende Parameter, die sich aus der geforderten Bildauflösung und Wiederholfrequenz ergeben, können je nach Anwendung gezielt eingestellt werden:

- Durchmesser des Spiegelements
- Maximaler Ablenkwinkel in den jeweiligen orthogonalen Ablenkrichtungen. Mit dem Durchmesser des Spiegels als Apertur ergibt sich die beugungsbegrenzte Bildauflösung.
- Betriebsfrequenz in der jeweiligen Richtung. Daraus ergeben sich die Bildauflösung und Bildwiederholrate, die sich durch Feinjustage des Frequenzverhältnisses der beiden Richtungen gegeneinander abwägen lassen.
- Ebenheit des Spiegels in jedem Betriebspunkt, um Abbildungsfehler, Pixelverschmierung und Specklemuster zu vermeiden.
- Das Spiegelement sollte durch eine geeignete Wahl der Amplituden der Wechselstromsignale um beide Drehachsen harmonisch schwingen, so dass keine Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Amplitude vorhanden ist, um ein stabiles Frequenzverhältnis zu gewährleisten.
- Die Resonanzen des Spiegelements sollten eine nicht zu geringe Bandbreite aufweisen, um die oben erwähnte Feinjustage zu ermöglichen.
- Kompakte Bauform
- Schockresistenz

[0094] Insbesondere kann das hier beschriebene Spiegelbauelement ein 2D-Design bieten, das alle Anforderungen für eine Auflösung von 1024 x 768 Bildpunkten ausreichend erfüllen kann. Das Spiegelbauelement kann besonders bevorzugt eine oder mehrere oder alle der nachfolgend genannten Eigenschaften aufweisen:

- Torsionsschwingungen für beide Richtungen, um eine harmonische Schwingung auch für größere Amplituden zu gewährleisten.
- Eine gleiche Dicke für alle beweglichen Teile, um einen hohen Prozessaufwand zu vermeiden.
- Die beiden Frequenzen sind deutlich unterschiedlich. Dadurch kann die Aufhängung des Spiegelements für eine Richtung optimiert werden. Dadurch kann weiterhin die Dicke etwas reduziert werden.
- Aus dem gewünschten Spiegelementdurchmesser, der Aufhängung, der gewünschten Frequenz und der geforderten Ebenheit ergibt sich in Verbindung mit dem Material die Dicke.
- Die Dimensionierung der ersten Torsionsfederelemente ergibt sich aus dem bereits definierten eigentlichen Spiegelement, aus der geforderten Frequenz und Auslenkung und aus der Belastbarkeit des Materials.
- Die zweiten Torsionsfederelemente sind außerhalb des Antriebsrings angebracht und bevorzugt um 90° zu den ersten Torsionsfederelementen gedreht.
- Der Antrieb für die zweite Torsionsschwingung ist bevorzugt auch auf dem beweglichen Antriebsring. Dies hat den Vorteil einer kompakten Bauform, außerdem wird durch das Trägheitsmoment des Antriebsrings die Frequenz abgesenkt.

[0095] Weiterhin kann das hier beschriebene piezoelektrische Spiegelbauelement einen oder mehrere der nachfolgend genannten Vorteile aufweisen:

- Beide Schwingungen sind über Torsionsfederelemente realisiert, das heißt, dass auch für hohe Auslenkungen die Schwingung harmonisch ist. Dies vermeidet die Anharmonie, die bei vielen anderen Designs durch Verbiegung der Aufhängung verursacht wird, wie z.B. bei den sogenannten „Quad-Pod“-Designs.
- Die zweiten Torsionsfederelemente für die langsamere Schwingung sind außerhalb des Antriebsrings angeordnet. Dieser wird mitbewegt. Dies erlaubt es, den Antrieb für die erste Torsionsschwingung zu optimieren, ohne wesentlich die Eigenschaften der zweiten Torsionsschwingung zu beeinflussen.
- Beide Schwingungen können sich einen Antriebsring teilen. Daraus ergibt sich eine sehr kompakte Bauform.
- Durch die elliptische Symmetrie des Antriebsrings hat man mehr Freiheitsgrade, um die Eigenschaften, insbesondere die Frequenzen und Ablenkwinkel, der beiden orthogonalen Torsionsschwingungen separat einzustellen. Zum Beispiel kann die Elliptizität des Antriebsrings optimiert werden, um die beste Ansteuerung der ersten Torsionsschwingung zu erhalten.

[0096] In einer besonders bevorzugten Ausführung weist das Spiegelbauelement folgende Eigenschaften auf, mit denen bevorzugt eine Auflösung von 1024 x 768 Pixeln mit einer Vollbild-Wiederholrate von knapp 50 Hz erreicht werden kann:

- Material: Silizium
- Metall der ersten Elektrode: Platin
- Metall der zweiten Elektrode: Gold
- Metall der reflektierenden Beschichtung: Aluminium
- Dicke des Siliziums: 175 µm
- Durchmesser der Spiegelbereichs mit der reflektierenden Beschichtung: 1,7 mm
- Torsionsfederelemente: 175 µm breit, 1 mm lang
- Antriebsring: 0,7 bis 0,95 mm breit.
- Material der piezoelektrischen Schicht: PZT mit einer Dicke in einem Bereich von 1 bis 2 µm.

[0097] In einer weiteren besonders bevorzugten Ausführung weist das Spiegelbauelement folgende Eigenschaften auf, mit denen bevorzugt eine Auflösung von 1024 x 768 Pixeln mit einer Vollbild-Wiederholrate von knapp 50 Hz erreicht werden kann:

- Material: Silizium
- Metall der ersten Elektrode: Platin
- Metall der zweiten Elektrode: Gold
- Metall der reflektierenden Beschichtung: Aluminium
- Dicke des Siliziums: 150 µm
- elliptischer Spiegelbereich mit der reflektierenden Beschichtung
- Ellipsenachsenlängen des Spiegelbereichs: 1,6 mm x 1,7 mm
- Torsionsfederelemente: 150 µm breit, 0,6 bis 0,8 mm lang
- Antriebsring: 0,7 bis 1,35 mm breit.
- Material der piezoelektrischen Schicht: PZT mit einer Dicke in einem Bereich von 1 bis 2 µm.

[0098] In Figur 17 ist eine schematische Darstellung einer Projektionsvorrichtung 1000 gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel gezeigt, die ein piezoelektrisches Spiegelbauelement 100 gemäß der vorherigen Beschreibung aufweist. Weiterhin weist die Projektionsvorrichtung eine Laserlichtquelle 200 auf, die im Betrieb Laserlicht 201 abstrahlt.

[0099] Beispielsweise kann es sich bei der Laserlichtquelle 200 um eine so genannte RGB-Lichtquelle handeln, die rotes, grünes und blaues Laserlicht abstrahlen kann. Hierzu kann die Laserlichtquelle 200 beispielsweise drei entsprechend modulierbare Laserdioden oder Laserdiodengruppen aufweisen. Die Laserlichtstrahlen können beispielsweise in einem Strahlkombinierer 202 überlagert werden, so dass ein Strahl von kombiniertem Laserlicht 201' auf das piezoelektrische Spiegelbauelement 100 eingestrahlt und von diesem in den gewünschten Bildbereich reflektiert werden kann. Die Laserlichtquelle 200 kann beispielsweise über eine Lasersteuerelektronik 206 angesteuert werden, beispielsweise um das Laserlicht zeitlich in der Amplitude zu modulieren.

[00100] Das piezoelektrische Spiegelbauelement 100 kann über eine Spiegelbauelement-Steuerelektronik 203 angesteuert werden, um beispielsweise die gewünschte Lissajous-Figur zu erzeugen, mit der der gewünschte Bildbereich abgescannt werden kann. Weiterhin kann eine Sensorelektronik 204 vorgesehen sein, um die Position und/oder die Frequenzen des Spiegelements des Spiegelbauelements 100 bevorzugt in Echtzeit zu detektieren. Darüber hinaus kann eine Bildprozessierungselektronik 205 vorhanden sein, die beispielsweise die ganze Bilddarstellung steuert. Dies kann insbesondere der Konvertierung von Bildbeziehungsweise Filminformationen in Steuersignale für die Laserlichtquelle 200 und das Spiegelbauelement 100 einschließlich der zeitlichen Synchronisierung zwischen der Spiegelement-Position und der Amplituden der unterschiedlichen Laser entsprechen.

[00101] Die Figuren 18A bis 18E zeigen schematische Darstellungen von Maßnahmen zur Positions- und/oder Frequenzbestimmung von Komponenten eines piezoelektrischen Spiegelbauelements gemäß einigen Ausführungsbeispielen. Diese Maßnahmen können in Verbindung mit einem Verfahren zum Betrieb des Spiegelbauelements vorgesehen sein. Beispielsweise können solche Maßnahmen in Verbindung mit der vorab beschriebenen Sensorelektronik 204 vorgesehen sein.

[00102] Beispielsweise können während des Betriebs des piezoelektrischen Spiegelbauelements 100 im ersten Wechselstromsignal die zweite Frequenz und im zweiten Wechselstromsignal die erste Frequenz gemessen werden. Wie in Figur 18A angedeutet ist, kann dies beispielsweise durch Verwendung geeigneter Frequenzfilter 71 in den Antriebszuleitungen 70 erreicht werden, so dass keine zusätzlichen Leitungen nötig sind.

[00103] Weiterhin kann es auch möglich sein, wie in den Figuren 18B und 18C angedeutet ist, dritte Ansteuerbereiche 523 zusätzlich zu den ersten und zweiten Ansteuerbereichen vorzusehen, in denen ein piezoelektrisches Signal über den piezoelektrischen Effekt gemessen werden kann. Die dritten Ansteuerbereiche 523, die auch als Sensorelemente oder Sensorbereiche bezeichnet werden können, können insbesondere an geeigneten Positionen vorgesehen sein, so dass ein gutes Signal erzielt werden kann.

[00104] Beispielsweise können die dritten Ansteuerbereiche 523 auf dem Antriebsring 20 platziert werden, beispielsweise nahe der ersten oder, wie in Figur 18B gezeigt, nahe der zweiten Torsionsfederelementen 42. Dass ein dritter Ansteuerbereich „nahe eines Torsionsfederelements“ angeordnet ist, kann insbesondere bedeuten, dass der besagte dritte Ansteuerbereich nahe am oder neben einem Fußpunkt des betreffenden Torsionsfederelements angeordnet ist und kein erster und zweiter Ansteuerbereich näher an dem betreffenden Torsionsfederelement angeordnet ist als der besagte dritte Ansteuerbereich. In Figur 18B sind rein beispielhaft vier dritte Ansteuerbereiche 523 vorgesehen, die symmetrisch zu den ersten und zweiten Torsionsfederelementen 42 angeordnet sind.

[00105] Weiterhin können dritte Ansteuerbereiche 523 auch auf dem Rahmenelement 30 ausgebildet sein, wie in Figur 18C gezeigt ist. Dadurch kann erreicht werden, dass der Antriebsring 20 vollständig für antreibende Ansteuerbereiche 521, 521', 522, 522' zur Verfügung stehen kann. Weiterhin sind die dritten Ansteuerbereiche 523 auf dem Rahmenelement 30 leichter herstellbar und leichter kontaktierbar, da keine zusätzlichen Leiterbahnen 54 zur Kontaktierung dieser über die zweiten Torsionsfederelemente 42 geführt werden müssen.

[00106] Wie in Figur 18C angedeutet ist, können beispielsweise vier dritte Ansteuerbereiche 523

als Sensorelemente Sa, Sb, Sc, Sd symmetrisch zu den ersten und zweiten Torsionsfederelementen 42 angeordnet sein. Durch Kontaktelemente 53a, 53b, 53c, 53d und Leiterbahnen 54 können die Sensorelemente Sa, Sb, Sc, Sd kontaktiert werden.

[00107] Beispielsweise können wie gezeigt zwei dritte Ansteuerbereiche 523, die die Sensorelemente Sa und Sb bilden, am Fußpunkt des einen der beiden zweiten Torsionsfederelemente 42 und zwei weitere dritte Ansteuerbereiche 523, die die Sensorelemente Sc und Sd bilden, am Fußpunkt des anderen der beiden zweiten Torsionsfederelemente 42 symmetrisch zu der durch die zweiten Torsionsfederelemente 42 gebildeten Achse angeordnet sein. Das Rahmenelement 30 kann unter den zweiten Ansteuerbereichen 523 gedünnt sein und insbesondere beispielsweise die gleiche Dicke wie der Antriebsring 20 aufweisen, um eine mechanische Beweglichkeit der dritten Ansteuerbereiche 523 zu ermöglichen. Beispielsweise kann das Rahmenelement 30 in den gestrichelt gekennzeichneten Bereichen 35, in denen sich die dritten Ansteuerelemente 523 befinden, eine reduzierte Dicke, also beispielsweise die gleiche Dicke wie der Antriebsring 20, aufweisen, während der Rest des Rahmenelements 30 oder zumindest ein Randteil des Rahmenelements wie oben beschrieben eine größere Dicke als die Bereiche 35 aufweisen kann. Mit anderen Worten sind die dritten Ansteuerbereiche bevorzugt in einem oder mehreren Bereichen des Rahmenelements 30 angeordnet, die im Vergleich zum übrigen Rahmenelement 30 oder zumindest im Vergleich zu einem Randteil des Rahmenelements 30 eine geringere Dicke aufweisen.

[00108] Durch die beschriebene Anordnung von Sensorelementen Sa, Sb, Sc und Sd auf dem Rahmenelement 30 können Auslenkungen in beide Richtungen, also Auslenkungen um die ersten Torsionselemente 41 und Auslenkungen um die zweiten Torsionselemente 42, gleichzeitig detektiert werden. Hierfür können Linearkombinationen der Signale der vier durch die dritten Ansteuerbereiche 523 gebildeten Sensorelemente Sa, Sb, Sc, Sd verwendet werden. Bezeichnet man die Signale der Sensorelemente der Einfachheit halber ebenfalls mit Sa, Sb, Sc und Sd, so können Schwingungen um die ersten Torsionsfederelemente 41 durch eine oder mehrere der Linearkombinationen $|Sa+Sb|$, $|Sc+Sd|$, $|Sa-Sc|$ und $|Sb-Sd|$ der Signale der Sensorelemente Sa, Sb, Sc und Sd und Auslenkungen um die zweiten Torsionsfederelemente 42 durch eine oder mehrere der Linearkombinationen $|Sa+Sc|$, $|Sb+Sd|$, $|Sa-Sb|$ und $|Sc-Sd|$ der Signale der Sensorelemente Sa, Sb, Sc und Sd erfasst werden. Durch die Verwendung mehrerer der genannten Linearkombinationen kann die Messgenauigkeit erhöht werden. Alternativ kann es auch möglich sein, dass beispielsweise nur zwei dritte Ansteuerbereiche 523 vorhanden sind, da diese prinzipiell ausreichend sind, um die gewünschten Informationen zu erhalten. Beispielsweise können nur diejenigen dritten Ansteuerbereiche 523 vorhanden sein, die die Sensorelemente Sa und Sb bilden oder die die Sensorelemente Sa und Sc bilden oder die die Sensorelemente Sc und Sd bilden oder die die Sensorelemente Sb und Sd bilden. Mit anderen Worten sollten im Fall von nur zwei Sensorelementen die zwei Sensorelemente nicht diagonal zueinander angeordnet sein, sondern sollten auf einer gleichen Seite mit Bezug auf die ersten Torsionsfederelemente 41 oder die zweiten Torsionsfederelemente 42 angeordnet sein.

[00109] Darüber hinaus kann es auch möglich sein, dass erste und/oder zweite Ansteuerbereiche vorhanden sind, die in einem Zeitmultiplexverfahren wechselweise zum Antrieb des Spiegelements oder des Antriebsrings und zur Messung eines piezoelektrischen Signals verwendet werden. Hierzu können also, wie in Figur 18C angedeutet ist, beispielsweise zumindest einige erste oder zweite Ansteuerbereiche 521, 521', 522, 522' vorhanden sein, die gleichzeitig als dritte Ansteuerbereiche vorgesehen sind. Dies kann insbesondere bedeuten, dass der Antrieb und die Positionsbestimmung zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt werden. Dies kann beispielsweise durch eine geeignete Pulsweitenmodulation erreicht werden, wobei alternierend für eine bestimmte Anzahl an Perioden das Spiegelement angetrieben und für eine kleinere Anzahl an Perioden die Messung durchgeführt wird. Aufgrund der großen mechanischen Güte verliert man dabei nur wenig Auslenkung des Spiegelements.

[00110] Weiterhin können zur Positions- und/oder Frequenzmessung, wie in Figur 18D angedeutet ist, zumindest zwei Elektrodenelemente 61, 61', 62, 62' vorhanden sein, die einen Kondensator bilden, der bei einer Bewegung des Spiegelements 10 oder des Antriebsrings 20 eine vari-

able Kapazität aufweist, wobei die Kapazität des Kondensators gemessen wird. Die Elektroden-elemente 61, 61', 62, 62' können beispielsweise durch Leiterbahnteile gebildet werden. Ein erstes Elektrodenelement 61 kann beispielsweise auf dem Rahmenelement 30 angeordnet sein, während ein zweites Elektrodenelement 62 auf dem Antriebsring 20 benachbart zum ersten Elektrodenelement 61 angeordnet ist. Bei einer Bewegung des Antriebsrings 20 relativ zum Rahmen-element 30 kann sich der Abstand zwischen den Elektrodenelementen 61, 62 ändern, wodurch sich die Kapazität des durch die Elektrodenelemente 61, 62 gebildeten Kondensators ändern kann. Entsprechend können weiterhin beispielsweise auch Elektrodenelemente auf dem Antriebsring 20 und dem Spiegelement 10 angeordnet werden.

[00111] Es kann auch möglich sein, beispielsweise zwei Elektrodenelemente 61', 62' auf gegenüber liegenden Seiten des Antriebsrings 20 auf dem Rahmenelement 30 anzuordnen. Der Antriebsring 20 kann dann bei einer Bewegung wie ein sich bewegendes Dielektrikum zwischen den Elektrodenelementen 61', 62' wirken. Entsprechend können auch zwei Elektrodenelemente auf dem Antriebsring 20 auf gegenüber liegenden Seiten des Spiegelements 10 angeordnet sein.

[00112] Bei solchen kapazitiven Messungen kann insbesondere auch der Nulldurchgang des Antriebsrings 20 und/oder des Spiegelements 10 ermittelt werden. Um einen kapazitiven Kurzschluss zu vermeiden, kann die erste Elektrode geeignet strukturiert sein.

[00113] In Verbindung mit den vorab beschriebenen Figuren ist durchgehend ein kreisrunder Spiegelbereich 11 gezeigt. Alternativ hierzu kann der Spiegelbereich 11 und damit auch die reflektierende Beschichtung 15 auch elliptisch ausgebildet sein, wie in den Figuren 19A und 19B in Ausschnitten von Spiegelbauelementen gezeigt ist, und eine größere Ellipsenachse G und kleinere Ellipsenachse K aufweisen. Bevorzugt sind die größere Ellipsenachse G entlang der ersten Richtung und die kleinere Ellipsenachsen K entlang der zweiten Richtung orientiert, wie in Figur 19A gezeigt ist. Alternativ hierzu können die größere Ellipsenachse G entlang der zweiten Richtung und die kleinere Ellipsenachse K entlang der ersten Richtung orientiert sein, wie in Figur 19B gezeigt ist. Die Durchbrüche 13 weisen im Fall eines elliptischen Spiegelbereichs 11 die Form von Ellipsenbögen auf. Das Verhältnis der größeren Ellipsenachse G zur kleineren Ellipsenachse K kann beispielsweise größer als 1 oder größer oder gleich 1,02 oder größer oder gleich 1,04 oder größer oder gleich 1,06 sowie kleiner oder gleich 1,1 oder kleiner oder gleich 1,08 oder kleiner oder gleich 1,07 sein.

[00114] Die in den in Verbindung mit den Figuren beschriebenen Merkmale und Ausführungsbeispiele können gemäß weiteren Ausführungsbeispielen miteinander kombiniert werden, auch wenn nicht alle Kombinationen explizit beschrieben sind. Weiterhin können die in Verbindung mit den Figuren beschriebenen Ausführungsbeispiele alternativ oder zusätzlich weitere Merkmale gemäß der Beschreibung im allgemeinen Teil aufweisen.

[00115] Die Erfindung ist nicht durch die Beschreibung anhand der Ausführungsbeispiele auf diese beschränkt. Vielmehr umfasst die Erfindung jedes neue Merkmal sowie jede Kombination von Merkmalen, was insbesondere jede Kombination von Merkmalen in den Ansprüchen beinhaltet, auch wenn dieses Merkmal oder diese Kombination selbst nicht explizit in den Ansprüchen oder Ausführungsbeispielen angegeben ist.

BEZUGSZEICHENLISTE

10	Spiegelelement
11	Spiegelbereich
12	Randbereich
13	Durchbruch
14	Verbindungsbereich
15	reflektierende Beschichtung
20	Antriebsring
30	Rahmenelement
31	Aussparung
32	Randteil
33	Aktuationsbereich
34	Durchbruch
35	Bereich
41	erstes Torsionsfederelement
42	zweites Torsionsfederelement
50	piezoelektrische Schicht
51	erste Elektrode
52	zweite Elektrode
521, 521'	erster Ansteuerbereich
522, 522'	zweiter Ansteuerbereich
523	dritter Ansteuerbereich
53, 53a, 53b, 53c, 53d	Kontaktelement
54	Leiterbahn
61, 61'	Elektrodenelement
62, 62'	Elektrodenelement
70	Zuleitung
71	Frequenzfilter
100	piezoelektrisches Spiegelbauelement
101	Träger
102	Bereich
200	Laserlichtquelle
201, 201'	Laserlicht
202	Strahlkombinierer
203	Spiegelbauelement-Steuerlektronik
204	Sensorelektronik
205	Bildprozessierungselektronik

206 Lasersteuerelektronik
1000 Projektionsvorrichtung
G, K Ellipsenachse
Sa, Sb, Sc, Sd Sensorelement

Ansprüche

1. Piezoelektrisches Spiegelbauelement (100), aufweisend
 - ein Spiegelement (10),
 - einen piezoelektrischer Antriebsring (20), der das Spiegelement umgibt und über zumindest ein erstes Torsionsfederelement (41) mit dem Spiegelement verbunden ist,
 - ein Rahmenelement (30), das über zumindest ein zweites Torsionsfederelement (42) mit dem Antriebsring verbunden ist.
2. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach Anspruch 1, wobei der Antriebsring einen ersten Durchmesser entlang einer ersten Richtung und einen zweiten Durchmesser entlang einer zur ersten Richtung senkrechten zweiten Richtung aufweist und der erste Durchmesser größer als der zweite Durchmesser ist.
3. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Antriebsring eine elliptische Form aufweist.
4. Piezoelektrisches Spiegelbauelemente nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei das zumindest eine erste Torsionsfederelement entlang der ersten Richtung angeordnet ist und das zumindest eine zweite Torsionsfederelement entlang der zweiten Richtung angeordnet ist.
5. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei der Antriebsring über zwei erste Torsionsfederelemente mit dem Spiegelement verbunden ist, die entlang einer Geraden an zwei gegenüber liegenden Seiten des Spiegelements angeordnet sind, und der Antriebsring über zwei zweite Torsionsfederelemente mit dem Rahmenelement verbunden ist, die entlang einer Geraden an zwei gegenüber liegenden Seiten des Antriebsrings angeordnet sind.
6. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei
 - das Spiegelement einen Spiegelbereich und einen den Spiegelbereich umgebenden Randbereich aufweist, der mittels zweier Durchbrüche teilweise vom Spiegelbereich getrennt ist, und
 - der Randbereich über zwei Verbindungsbereiche mit dem Spiegelbereich verbunden ist.
7. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach Anspruch 6, wobei auf dem Spiegelbereich eine reflektierende Beschichtung aufgebracht ist und der Randbereich und die Verbindungsbereiche frei von der reflektierenden Beschichtung sind.
8. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach Anspruch 6 oder 7, wobei der Spiegelbereich kreisrund oder elliptisch ausgebildet ist.
9. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei das Rahmenelement den Antriebsring umgibt und eine das Rahmenelement durchdringende Aussparung aufweist, in dem der Antriebsring und das zumindest eine zweite Torsionsfederelement angeordnet sind.
10. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei das Spiegelement und der Antriebsring eine geringere Dicke als zumindest ein Randteil des Rahmenelements aufweist und das Rahmenelement, der Antriebsring, das Spiegelement und die Torsionsfederelemente einstückig ausgebildet sind.
11. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei auf dem Antriebsring eine erste Elektrode und eine in eine Mehrzahl von Ansteuerbereichen strukturierte zweite Elektrode aufgebracht ist und zwischen der ersten und zweiten Elektrode eine piezoelektrische Schicht angeordnet ist.
12. Piezoelektrisches Spiegelbauelemente nach Anspruch 11, wobei auf dem Rahmenelement zumindest teilweise die erste Elektrode und zumindest teilweise die piezoelektrische Schicht aufgebracht sind.

13. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach Anspruch 12, wobei die zweite Elektrode in einem von einem Randteil umgebenen Aktuationsbereich des Rahmenelements aufgebracht ist und der Aktuationsbereich eine geringere Dicke als der Randteil aufweist.
14. Piezoelektrisches Spiegelbauelemente nach Anspruch 13, wobei der Aktuationsbereich mittels zumindest eines Durchbruchs teilweise vom Randteil getrennt ist.
15. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach einem der Ansprüche 11 bis 14, wobei
 - auf dem Rahmenelement Kontaktelemente zur Ansteuerung der ersten und zweiten Elektrode vorhanden sind und
 - Ansteuerbereiche der zweiten Elektrode über Leiterbahnen, die über das zumindest eine zweite Torsionsfederelement verlaufen, mit Kontaktelementen verbunden sind.
16. Piezoelektrisches Spiegelbauelemente nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei zumindest zwei Elektrodenelemente vorhanden sind, die einen Kondensator bilden, der bei einer Bewegung des Spiegelements oder des Antriebsrings eine variable Kapazität aufweist.
17. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei zumindest zwei dritte Ansteuerbereiche (523) auf dem Rahmenelement auf einer gleichen Seite in Bezug auf das zumindest eine erste Torsionsfederelement oder das zumindest eine zweite Torsionsfederelement angeordnet sind.
18. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach dem vorherigen Anspruch, wobei die dritten Ansteuerbereiche in einem oder mehreren Bereichen (35) des Rahmenelements angeordnet sind, die im Vergleich zu zumindest einem Randteil des Rahmenelements eine geringere Dicke aufweisen.
19. Piezoelektrisches Spiegelbauelement nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei Maßnahmen vorgesehen sind, um eine Positionsbestimmung des Spiegelements und/oder eine Positionsbestimmung des Antriebsrings und/oder eine Frequenzbestimmung einer oder beider Torsionsschwingungen zu erreichen.
20. Verfahren zum Betrieb eines piezoelektrischen Spiegelbauelements (100) nach einem der vorherigen Ansprüche, bei dem das Spiegelement (10) mittels eines ersten elektrischen Wechselstromsignals mit einer ersten Frequenz, das auf erste Ansteuerbereiche (521, 521') wirkt, in eine erste Torsionsschwingung und der Antriebsring (20) mittels eines zweiten elektrischen Wechselstromsignals mit einer zweiten Frequenz, das auf zweite Ansteuerbereiche (522, 522') wirkt, in eine zweite Torsionsschwingung versetzt werden.
21. Verfahren nach Anspruch 20, bei dem während des Betriebs des piezoelektrischen Spiegelbauelements im ersten Wechselstromsignal die zweite Frequenz und im zweiten Wechselstromsignal die erste Frequenz gemessen werden.
22. Verfahren nach Anspruch 20, bei dem dritte Ansteuerbereiche (523) vorhanden sind, in denen ein piezoelektrisches Signal gemessen wird.
23. Verfahren nach Anspruch 20 mit Rückbezug auf Anspruch 14, bei dem die Kapazität des Kondensators gemessen wird.
24. Verfahren nach Anspruch 20, bei dem erste und/oder zweite Ansteuerbereiche vorhanden sind, die in einem Zeitmultiplexverfahren wechselweise zum Antrieb des Spiegelements oder des Antriebsrings und zur Messung eines piezoelektrischen Signals verwendet werden.
25. Projektionsvorrichtung (1000), aufweisend
 - einen Laserlichtquelle (200) und
 - ein piezoelektrisches Spiegelbauelement (100) nach einem der Ansprüche 1 bis 19.

Hierzu 43 Blatt Zeichnungen

FIG 1A

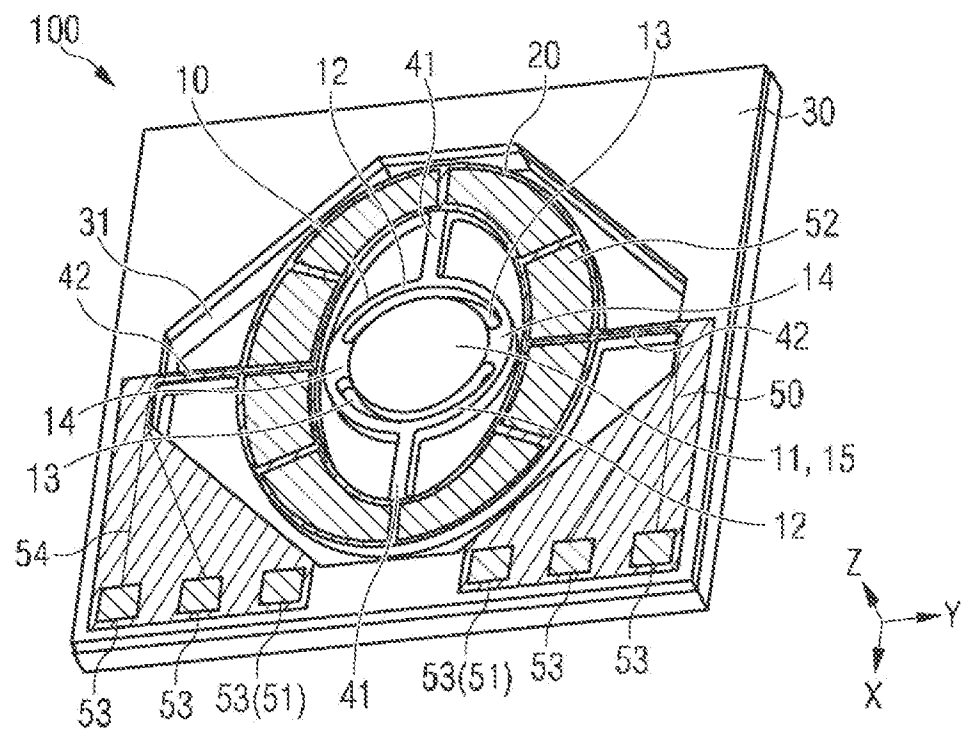


FIG 1B

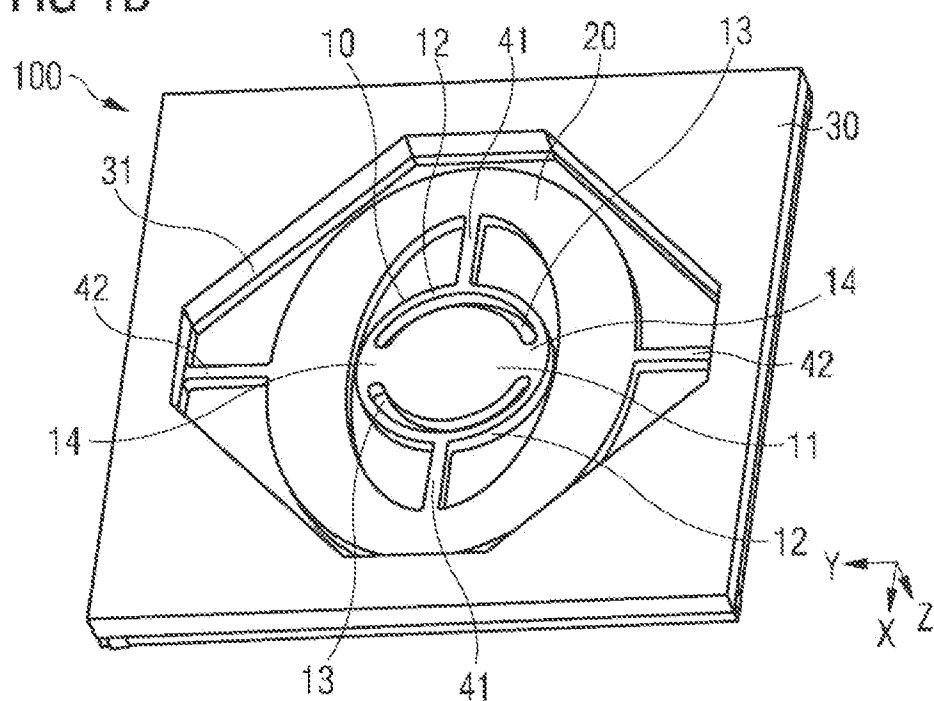


FIG 2A

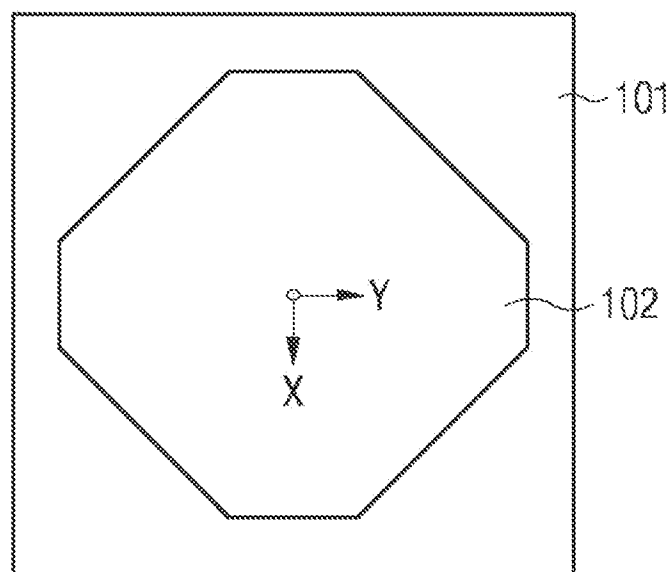


FIG 2B

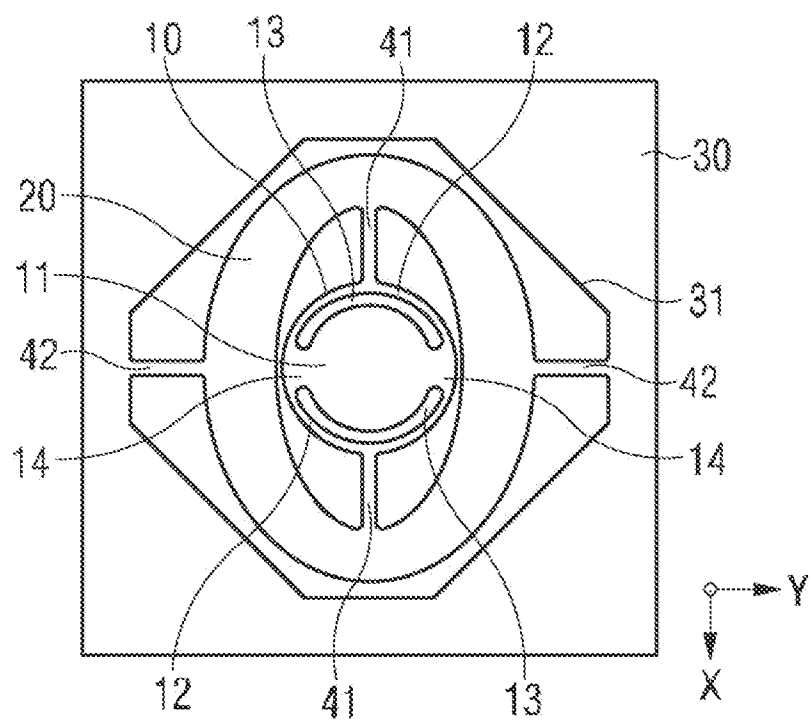


FIG 2C

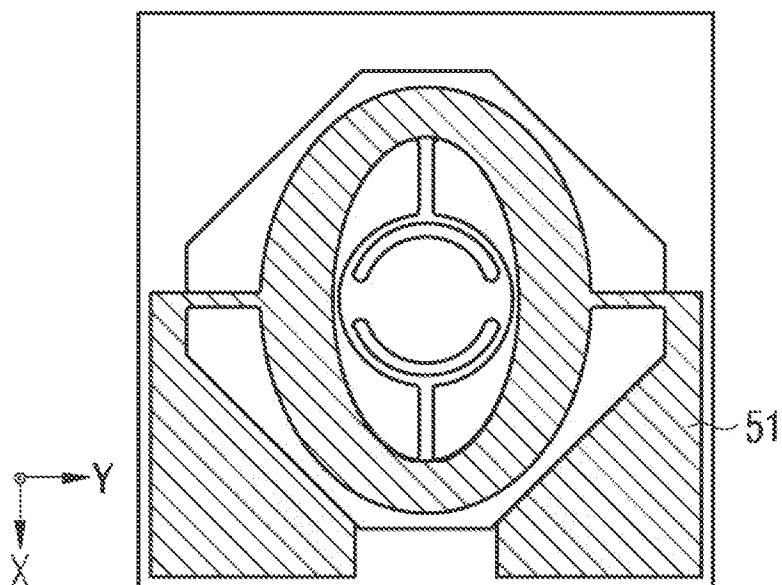


FIG 2D

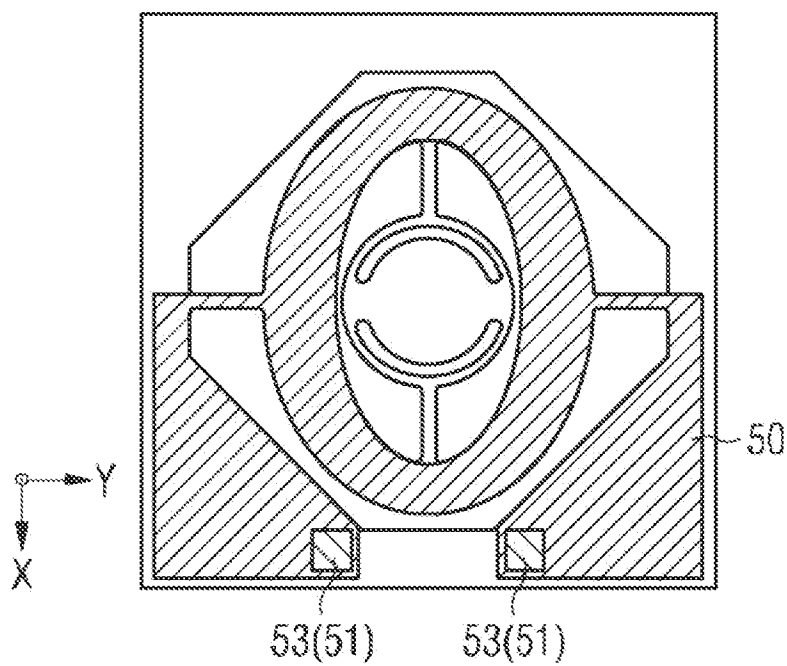


FIG 2E

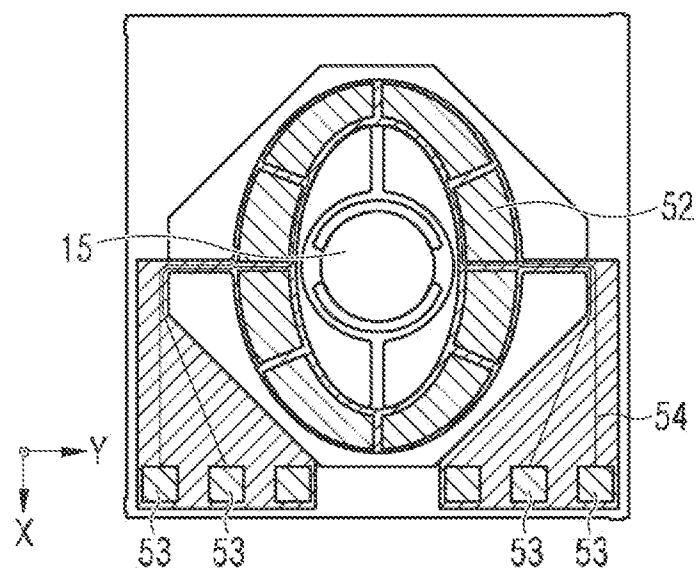


FIG 3A

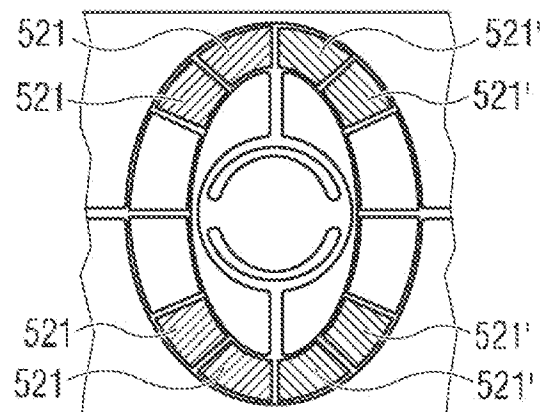


FIG 3B

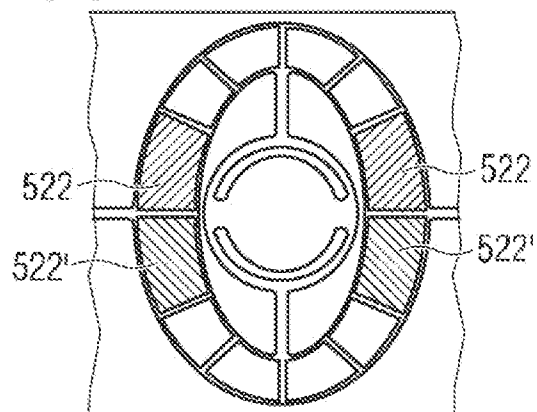


FIG 4A

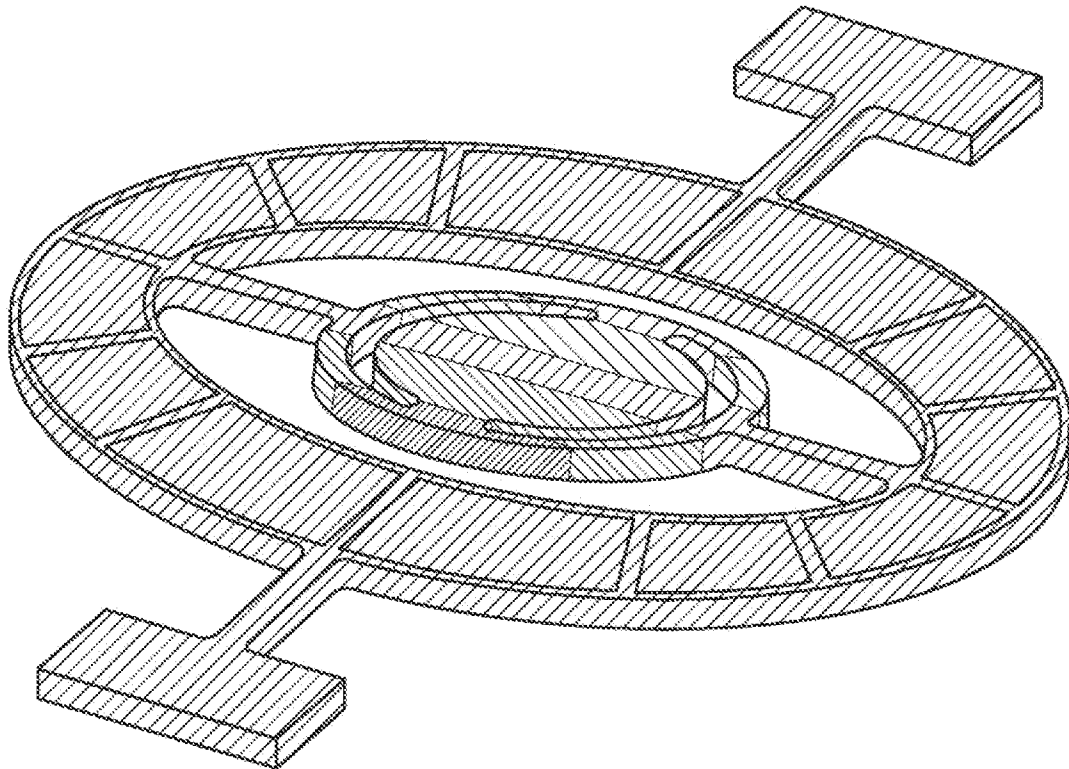


FIG 4B

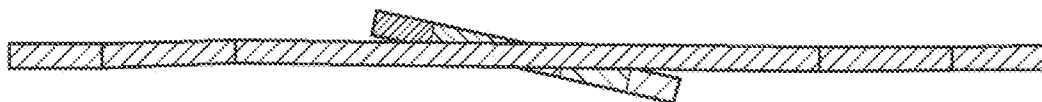


FIG 4C

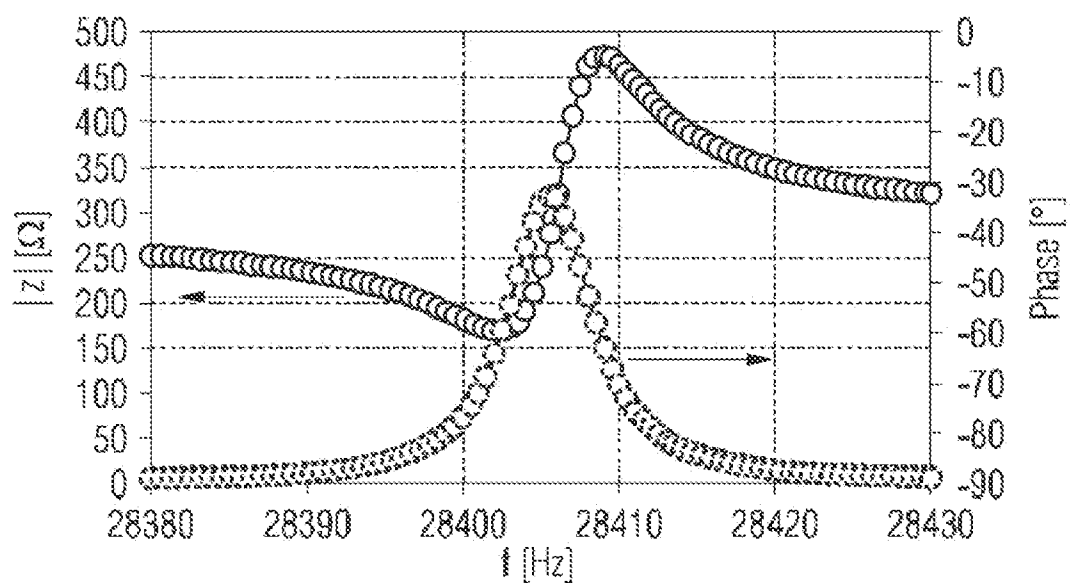
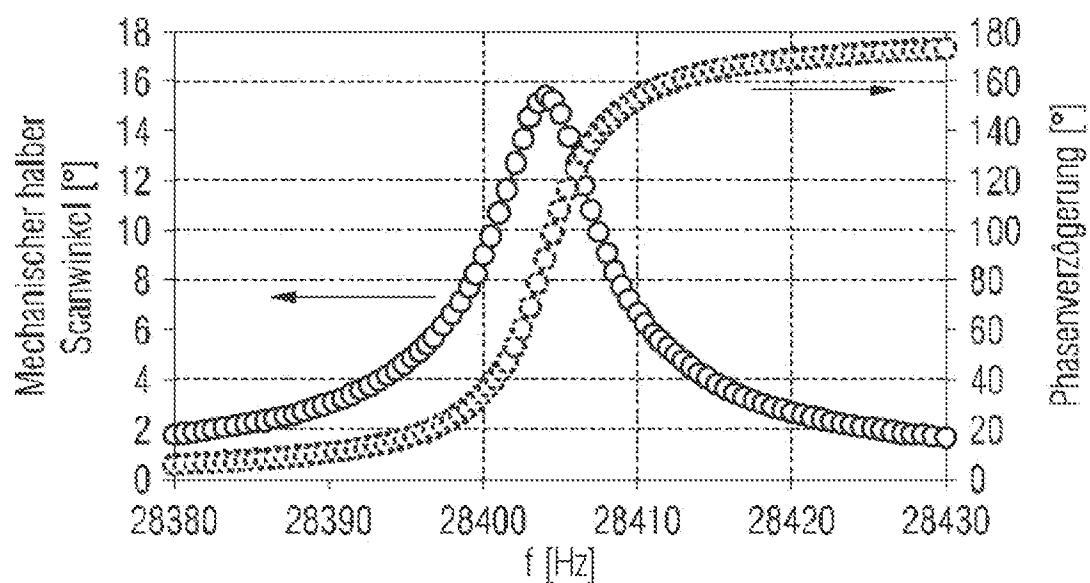


FIG 4D

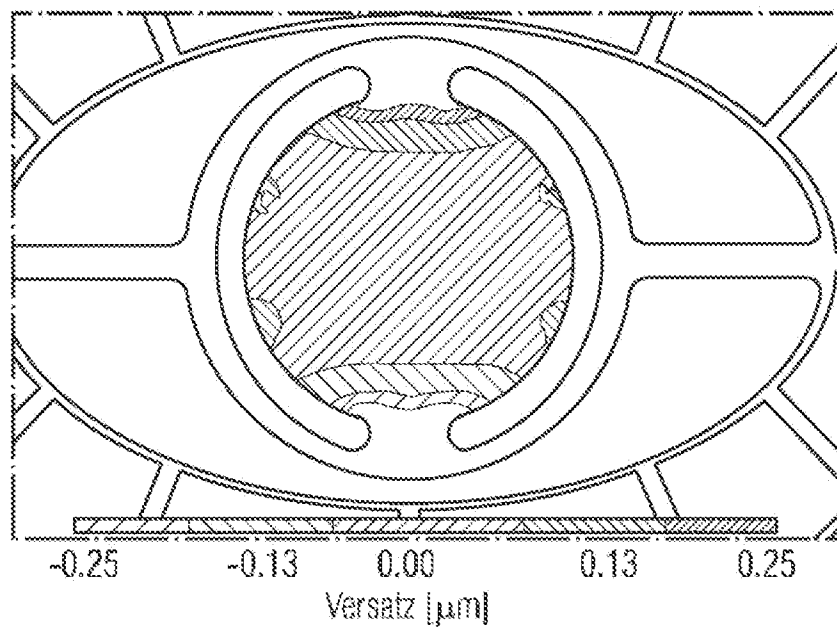


FIG 4E

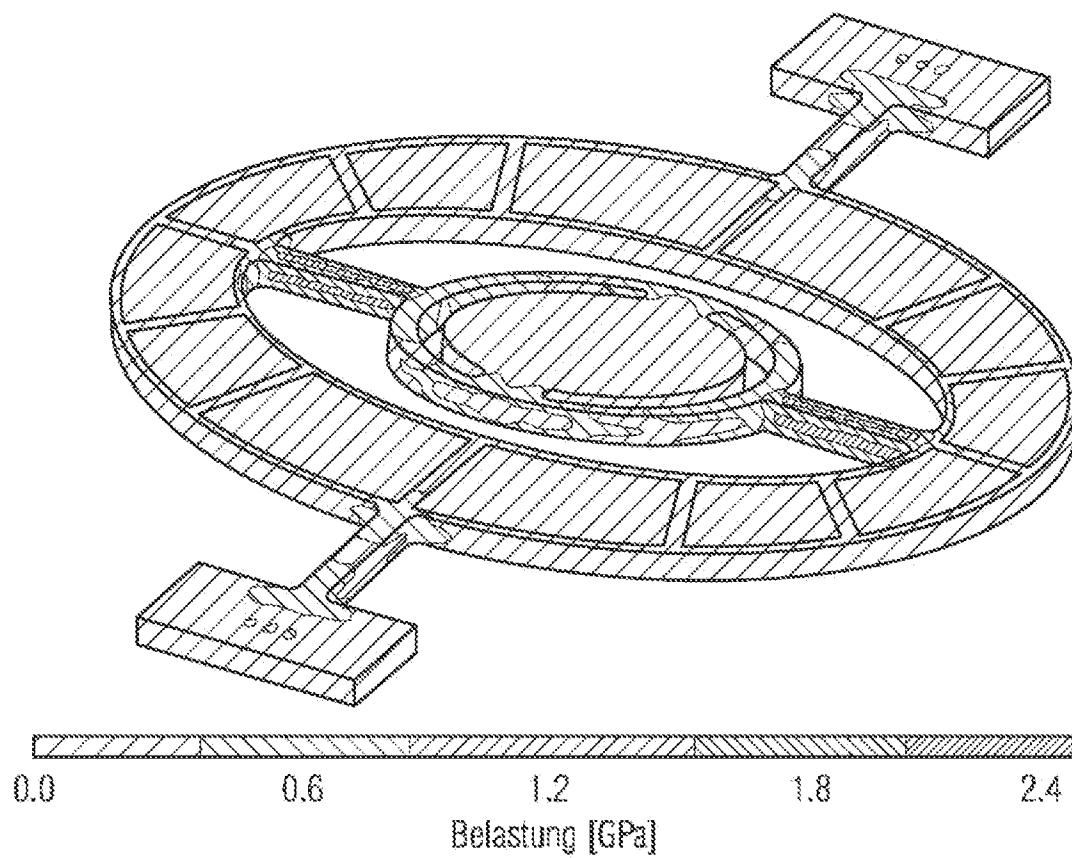


FIG 5A

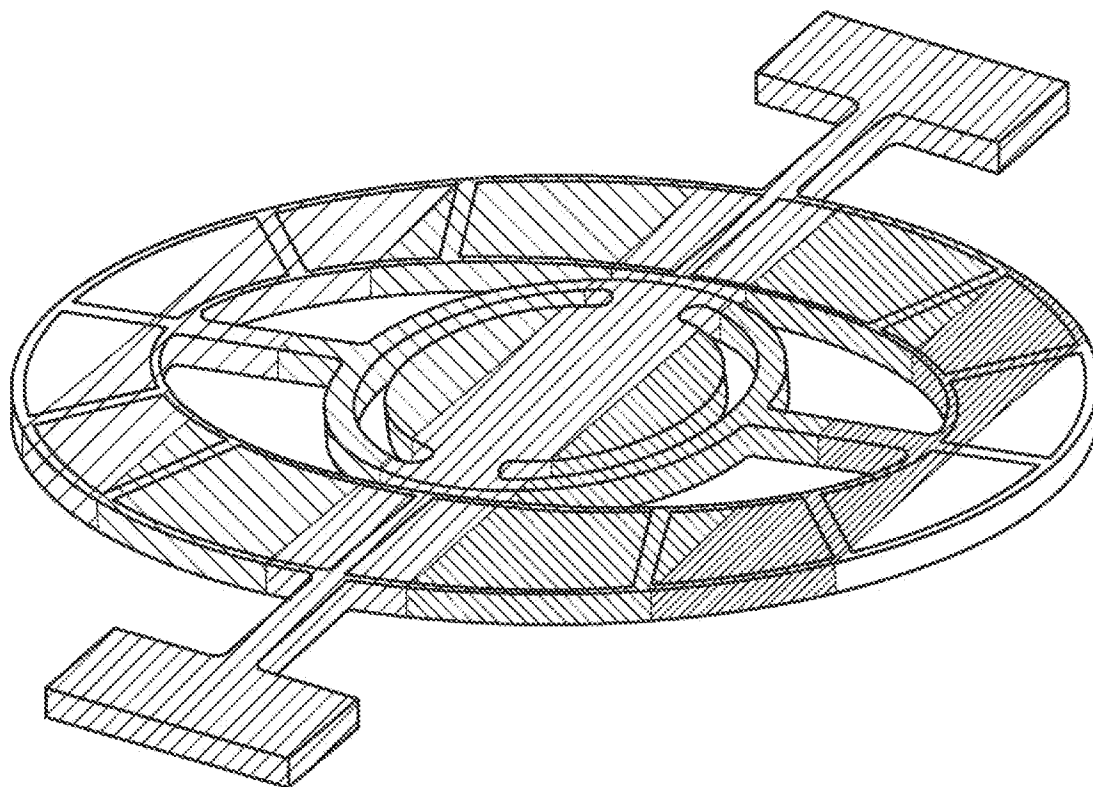


FIG 5B

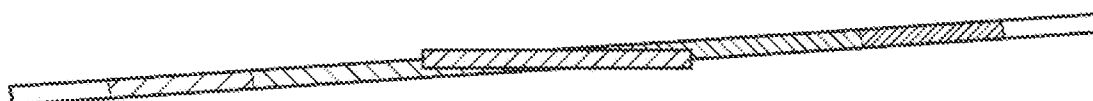


FIG 5C

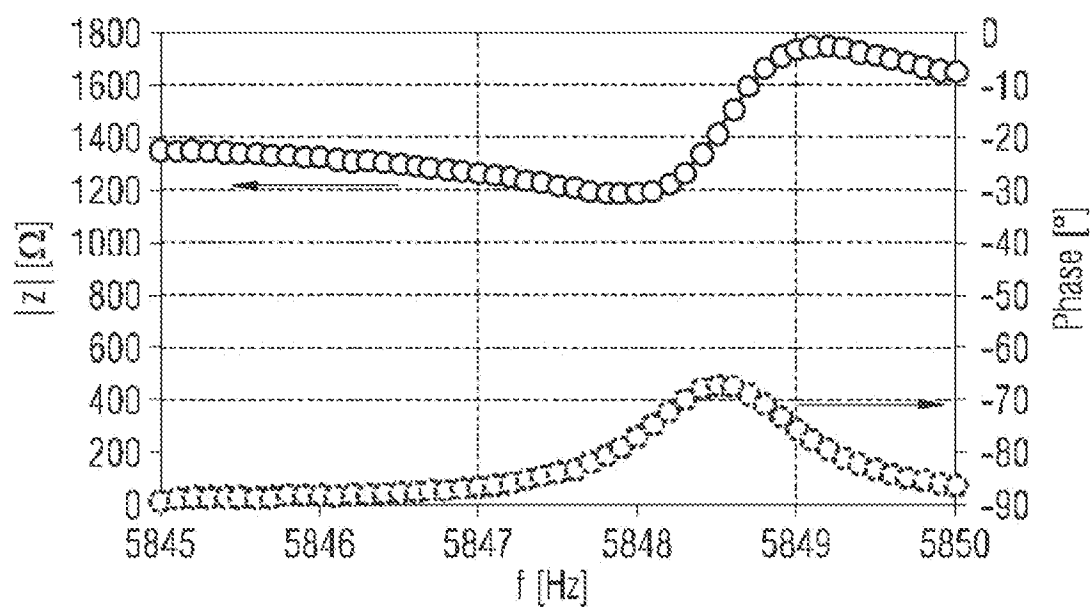
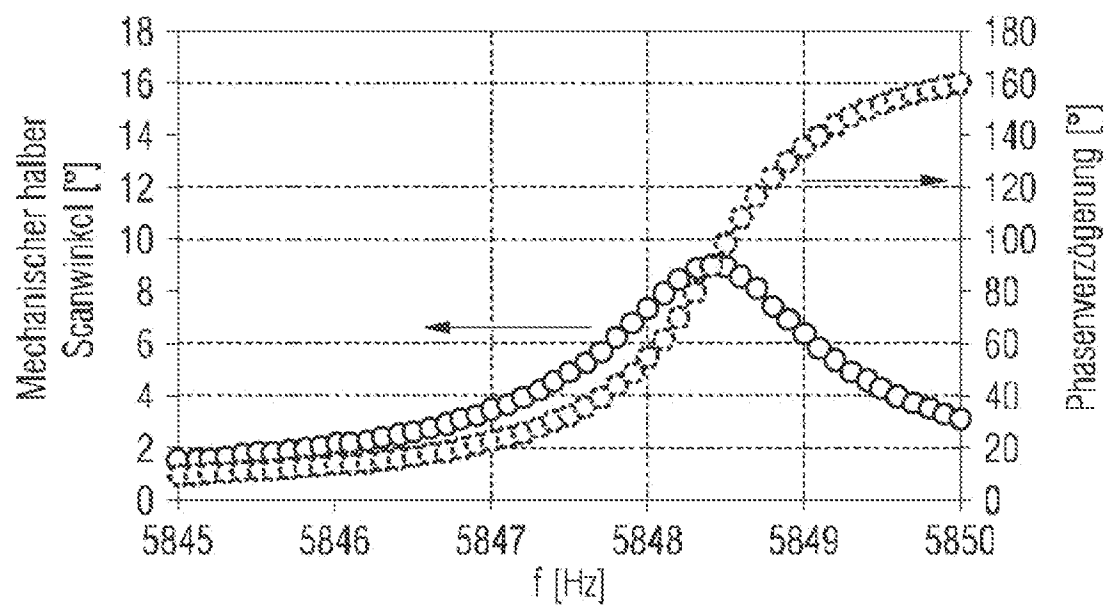


FIG 5D

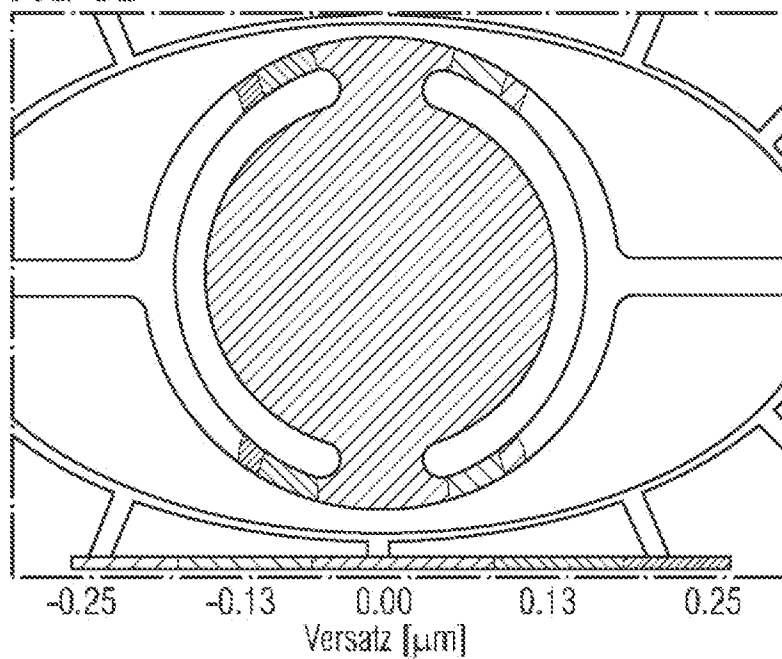


FIG 5E

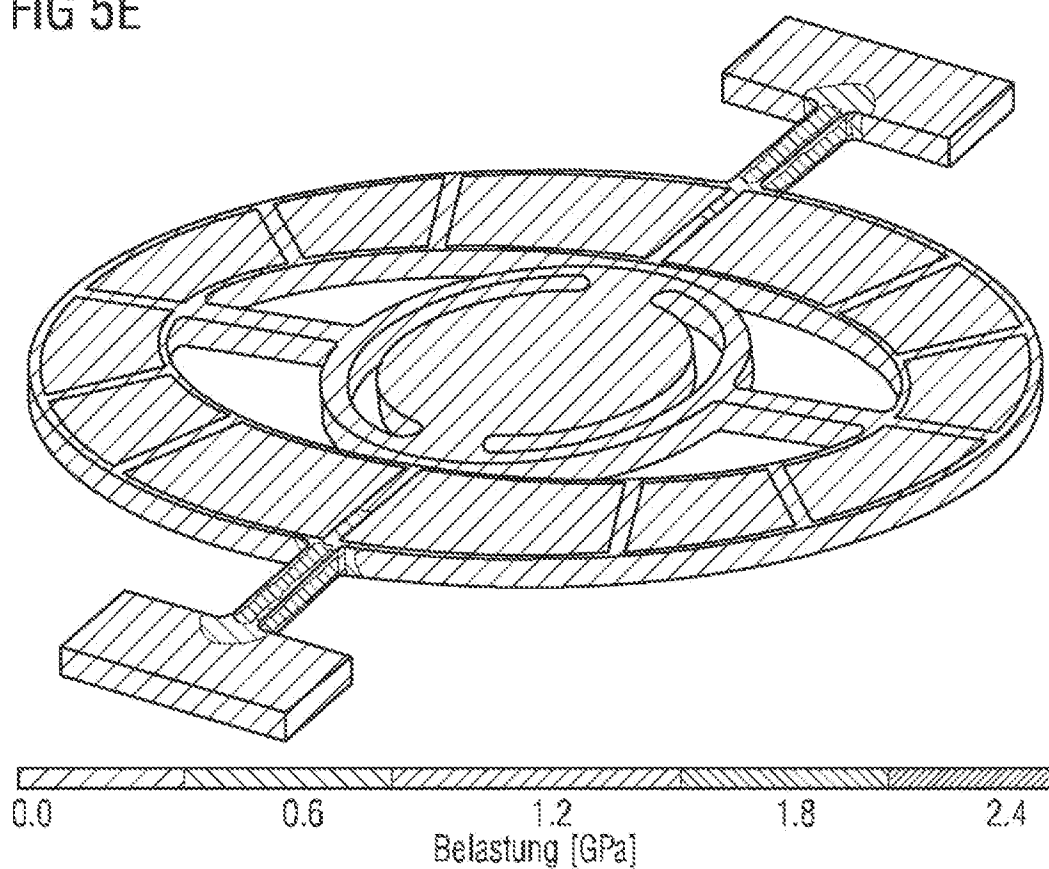


FIG 6A

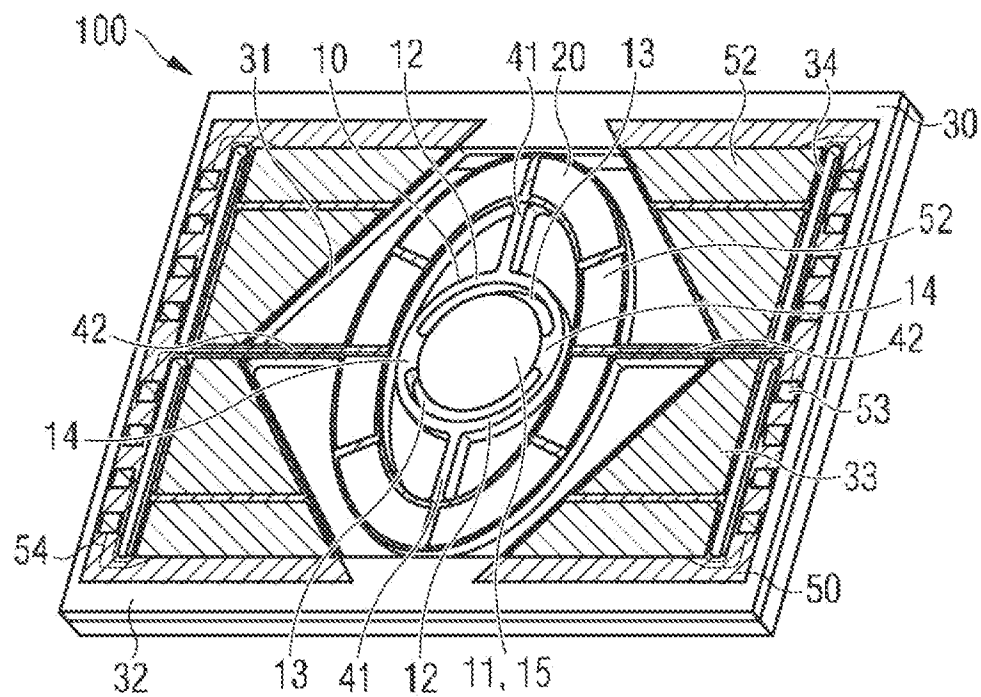


FIG 6B

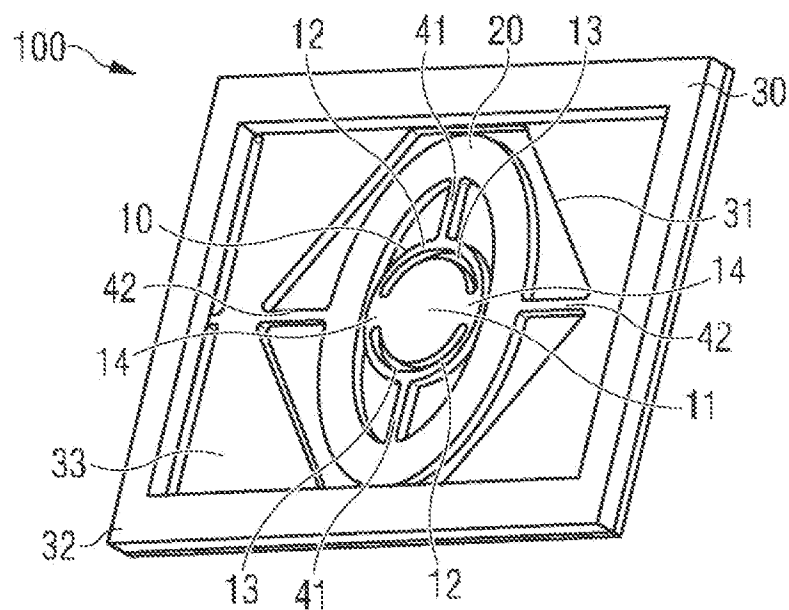


FIG 7A

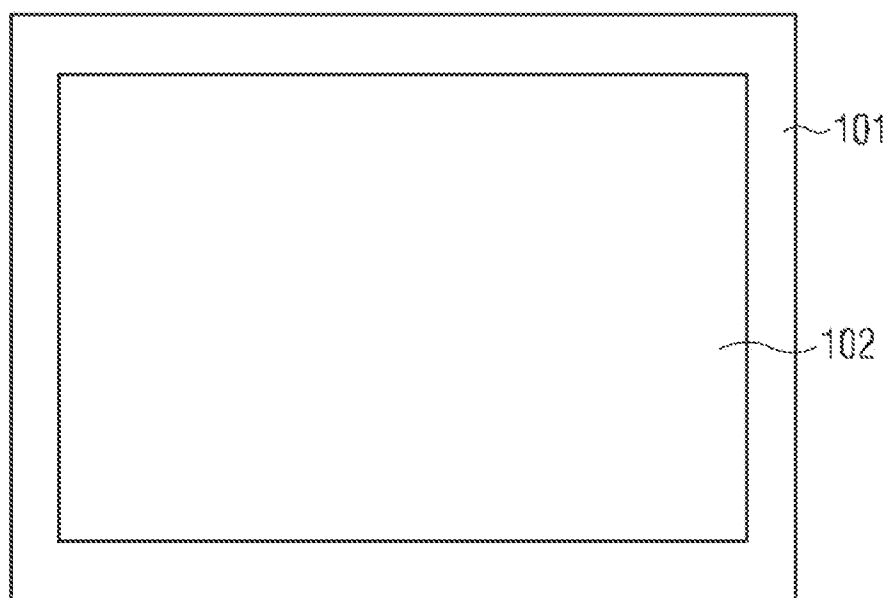


FIG 7B

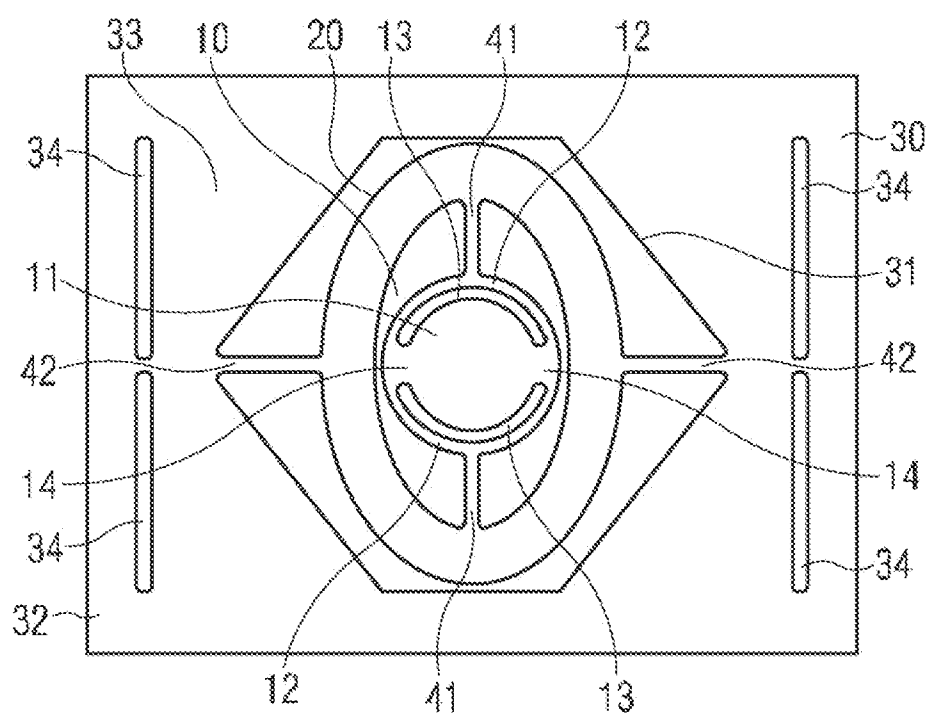


FIG 7C

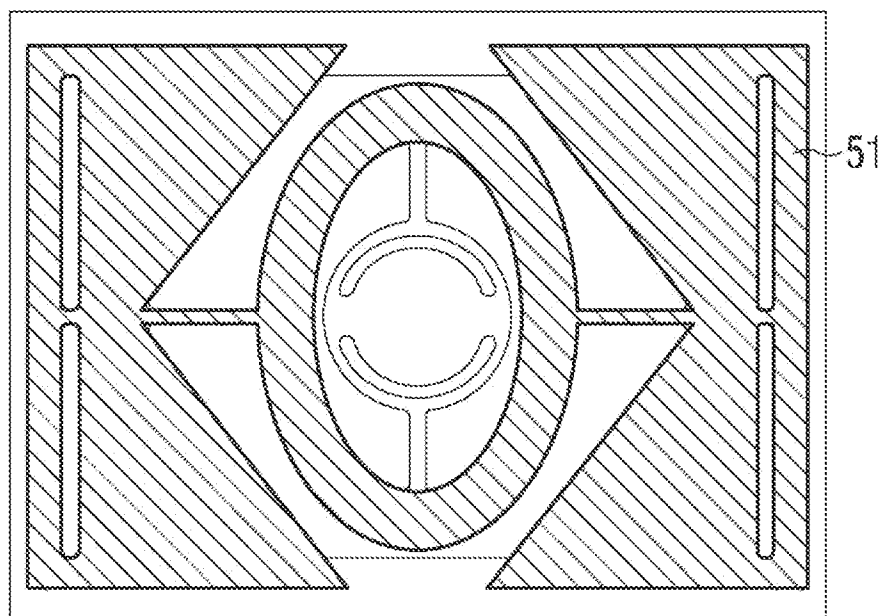


FIG 7D

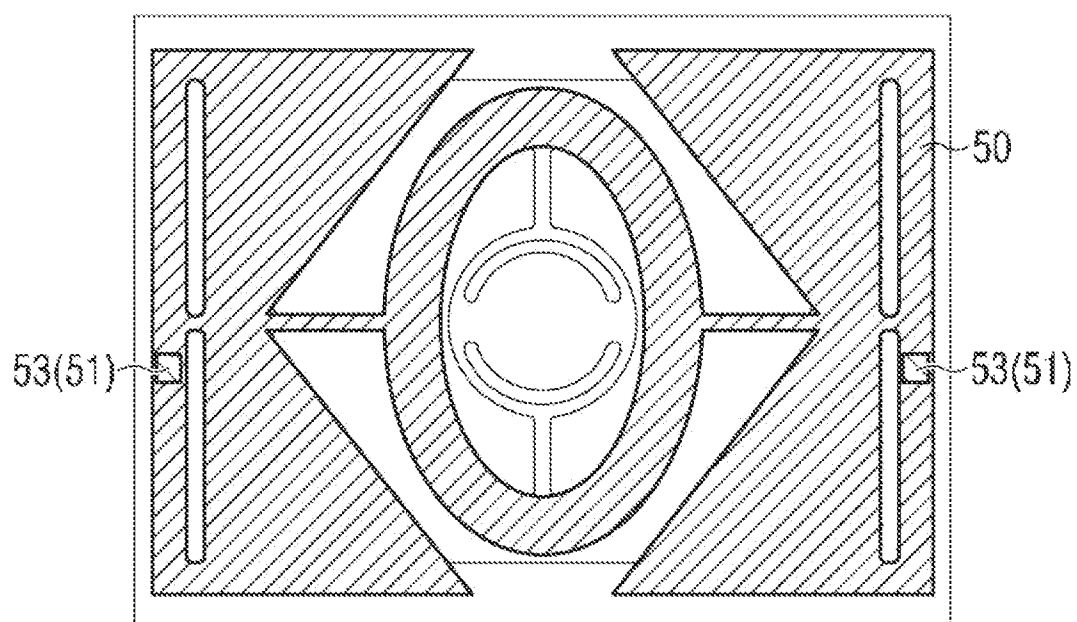


FIG 7E

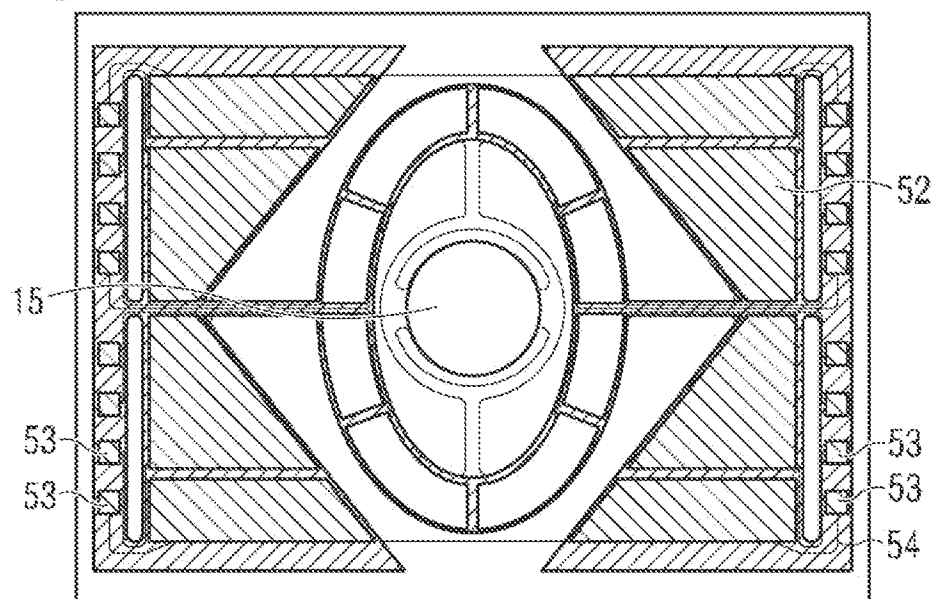


FIG 8A

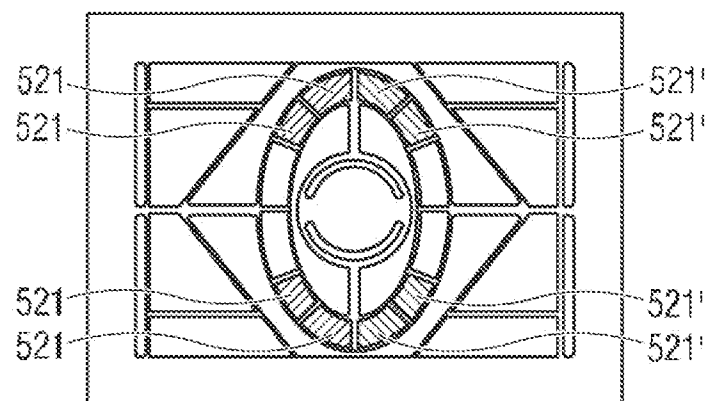


FIG 8B

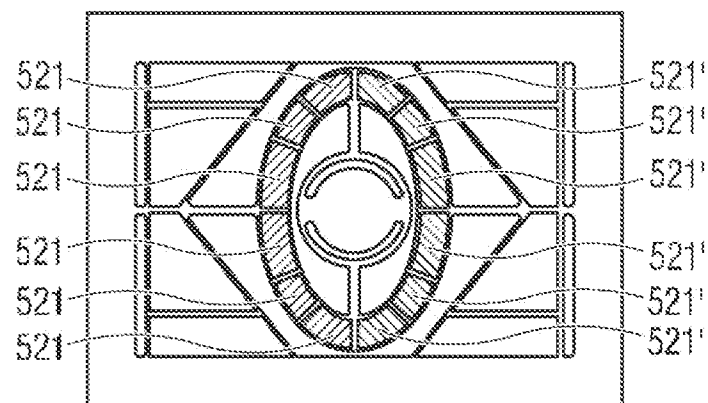


FIG 8C

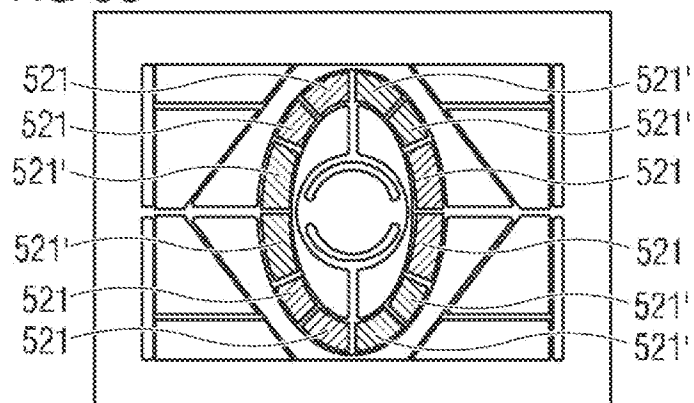


FIG 8D

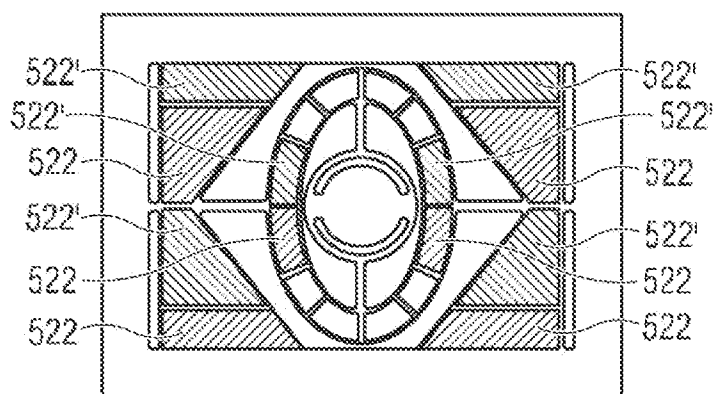


FIG 8E

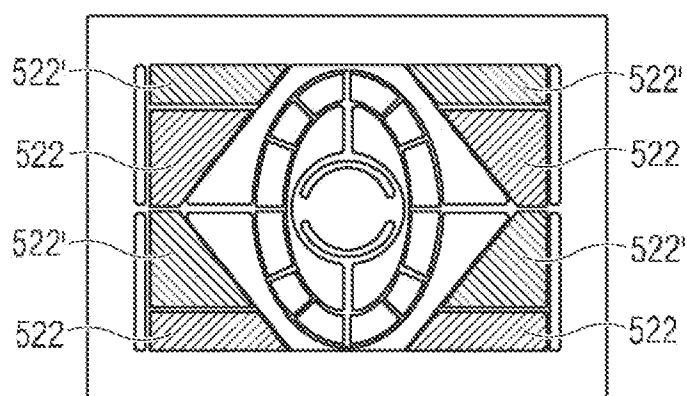


FIG 9A

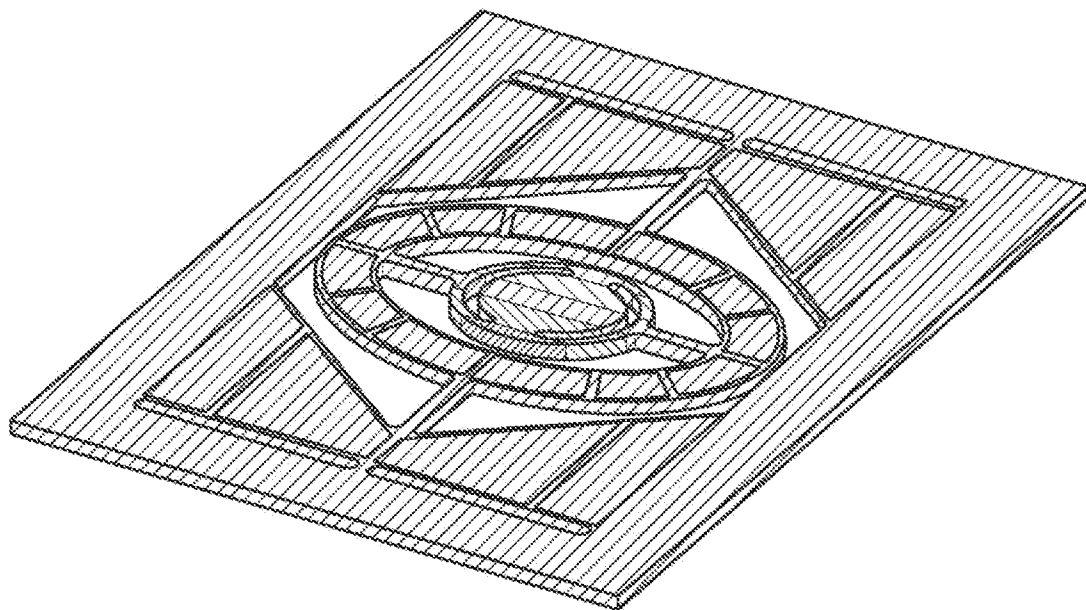


FIG 9B

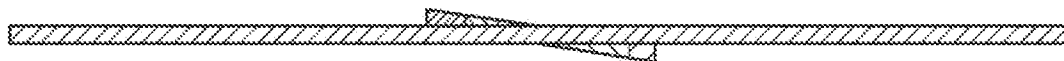


FIG 9C

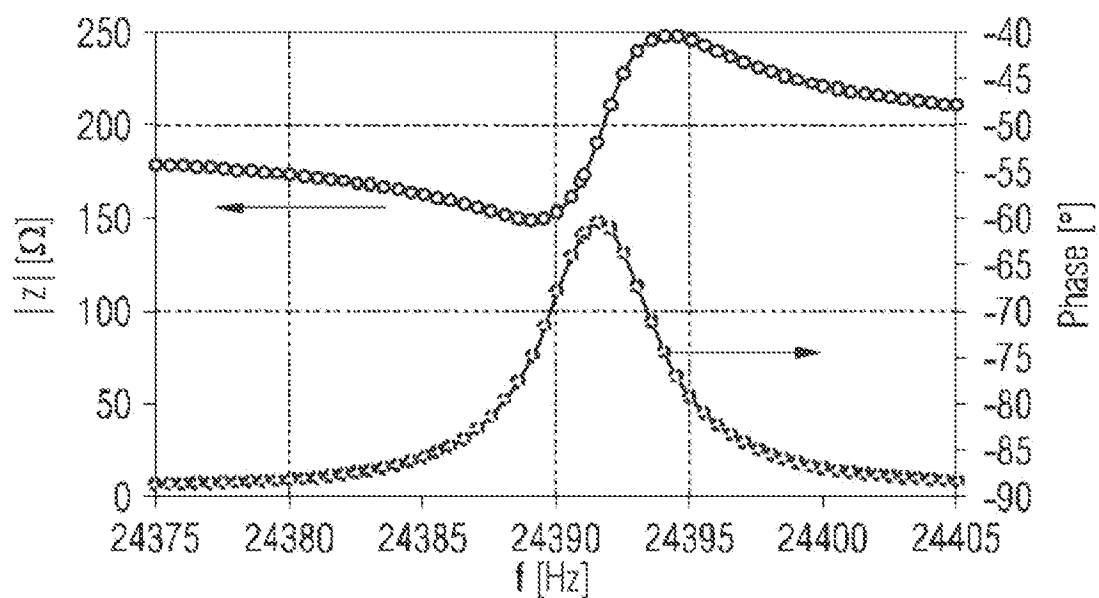
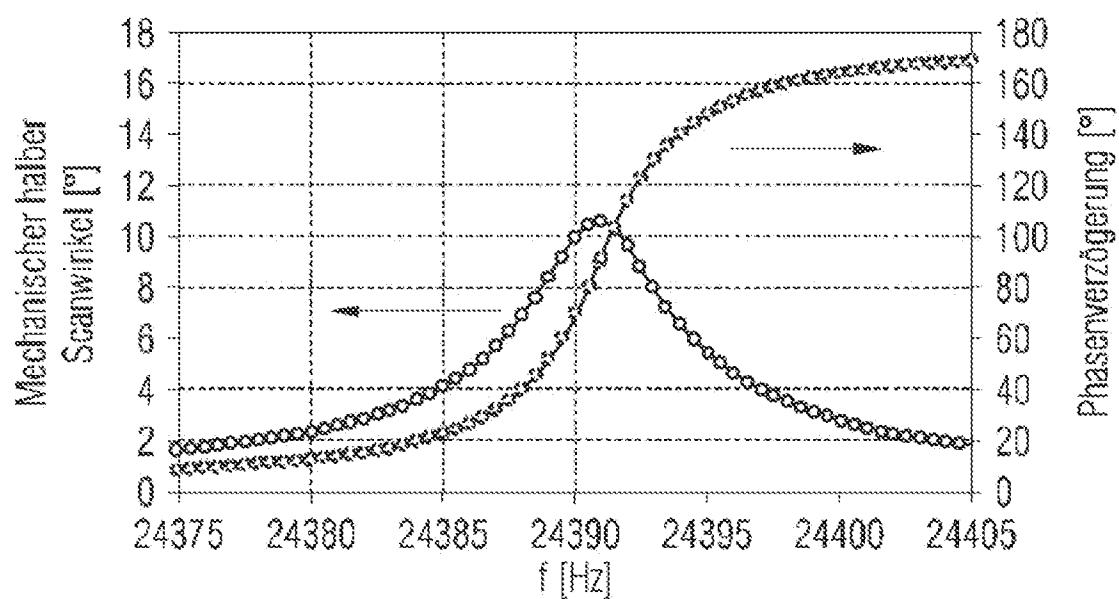


FIG 9D

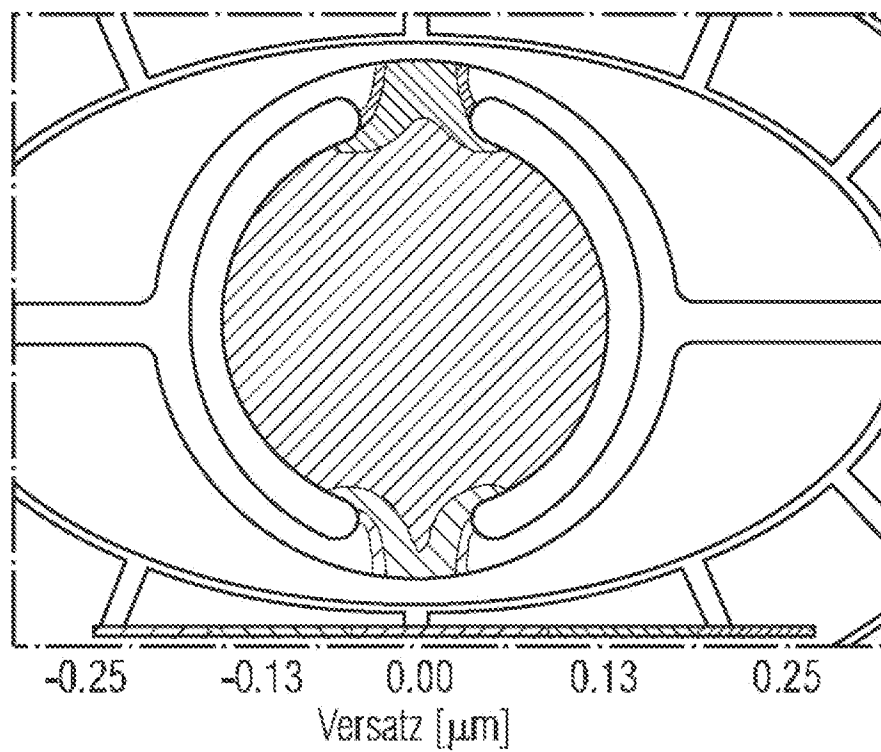


FIG 9E

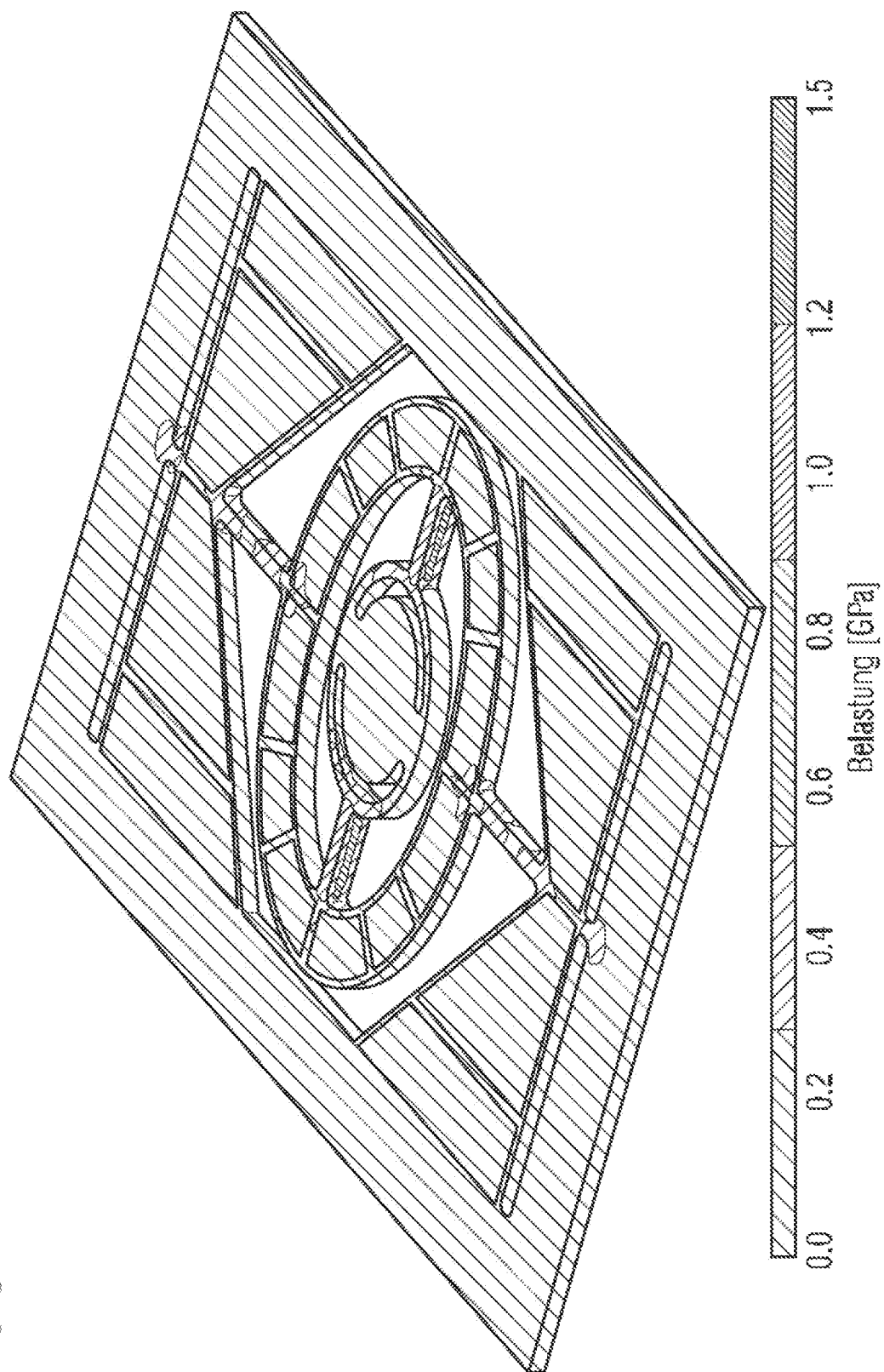


FIG 10A

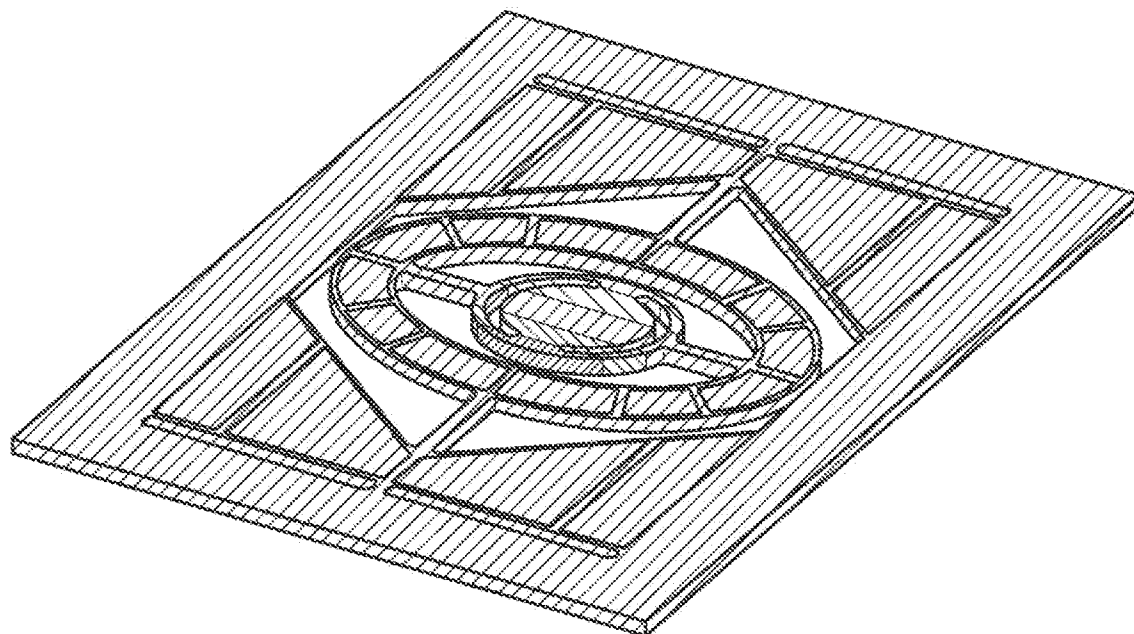


FIG 10B

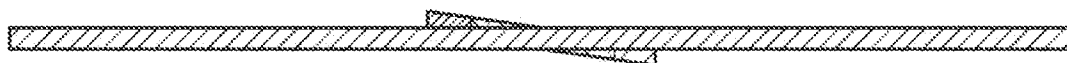


FIG 10C

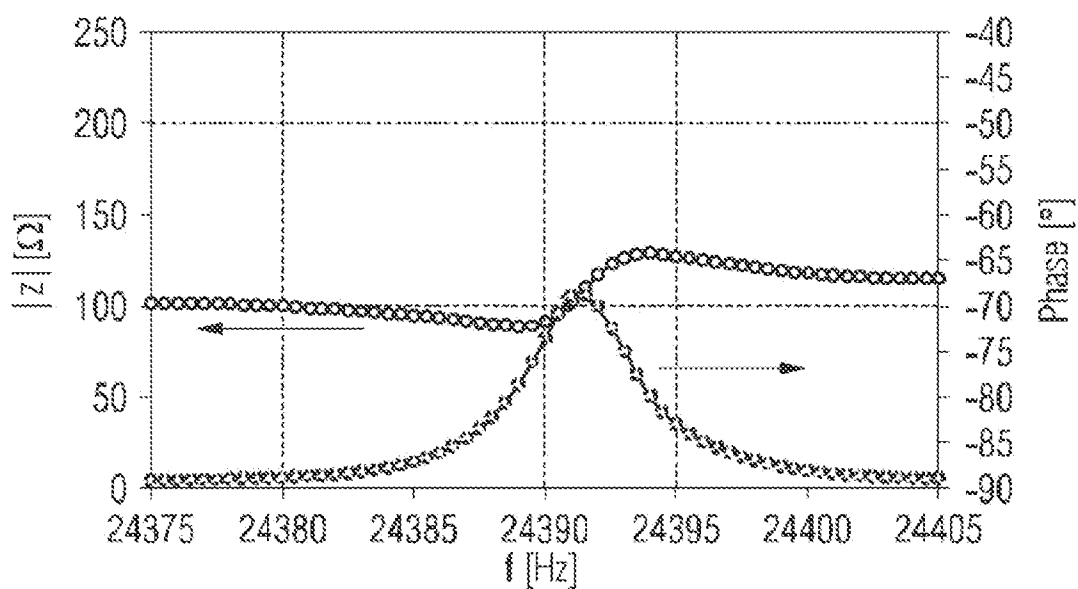
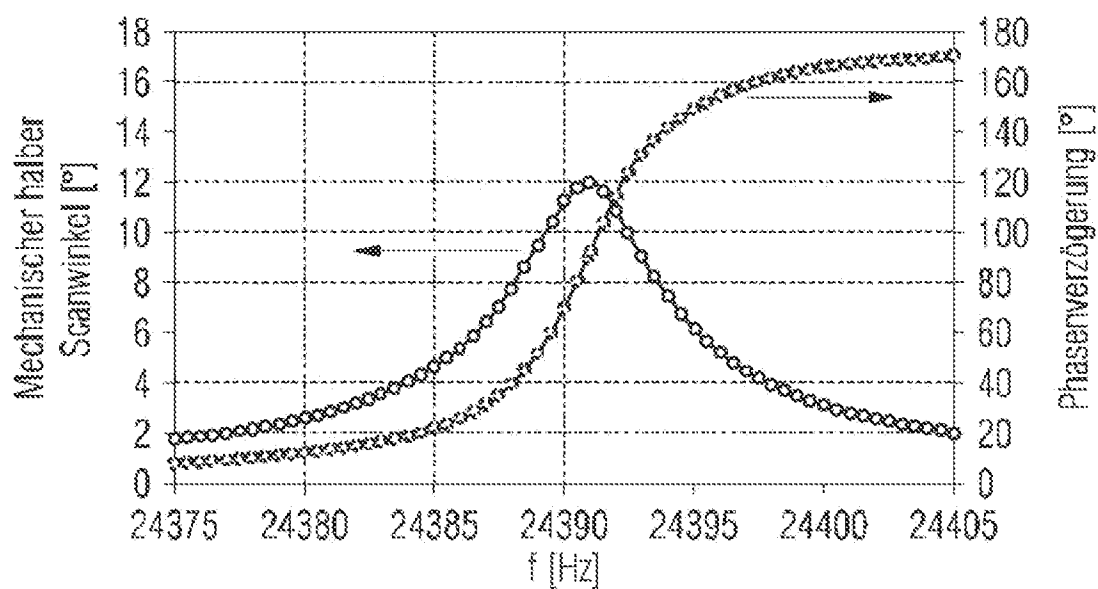


FIG 10D

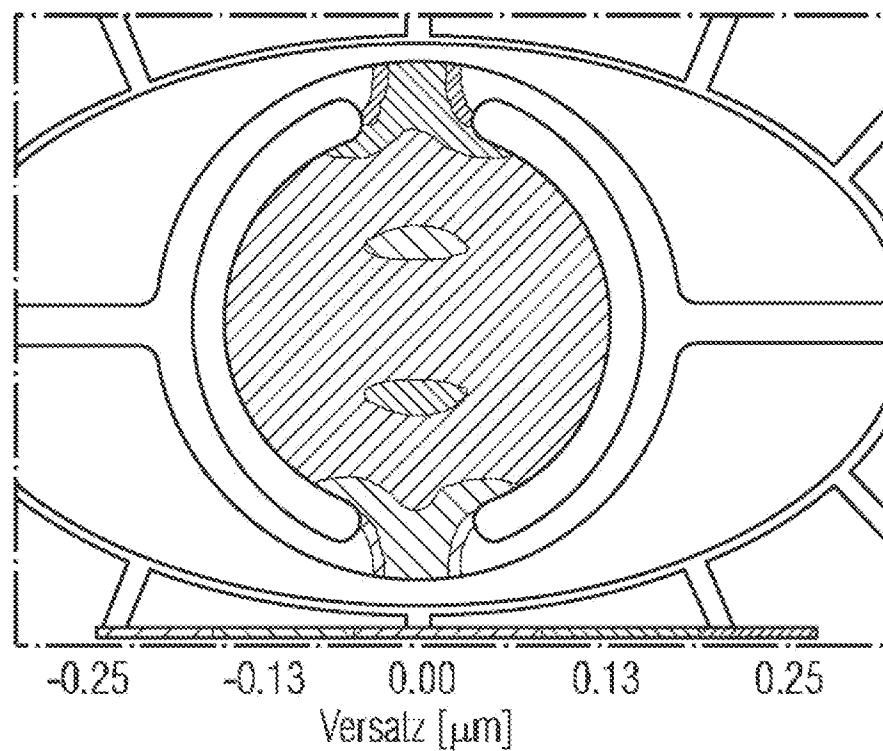


FIG 10E

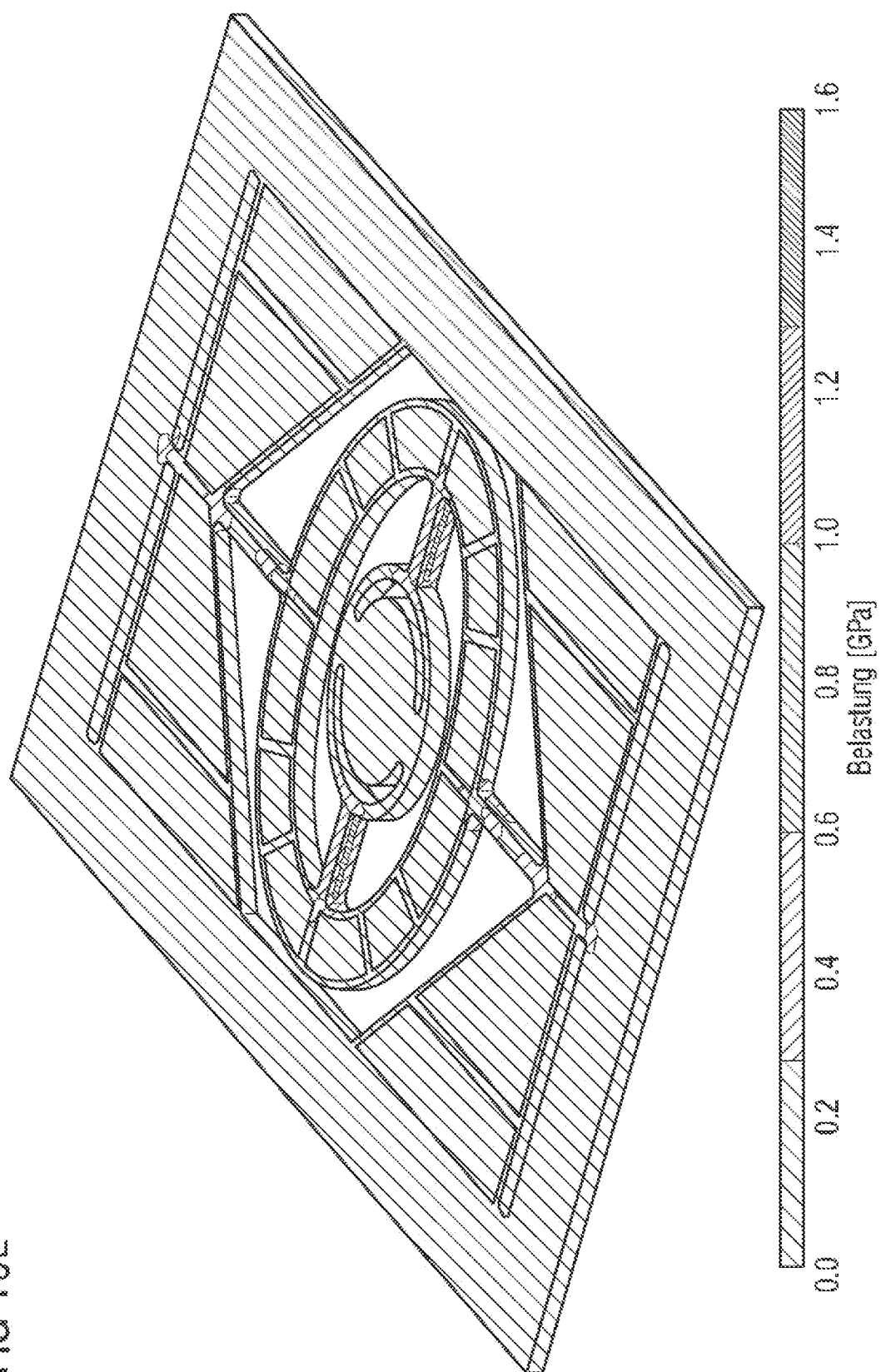


FIG 11A

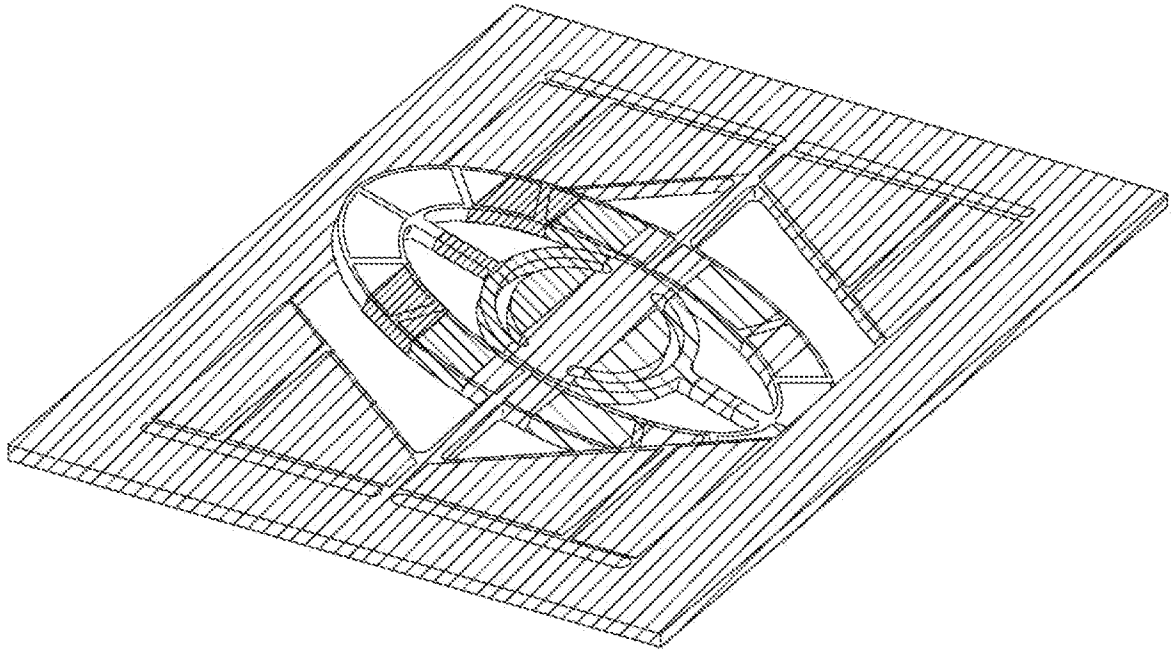


FIG 11B

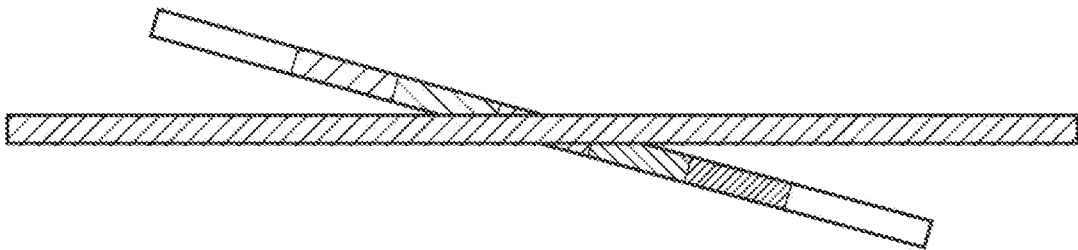


FIG 11C

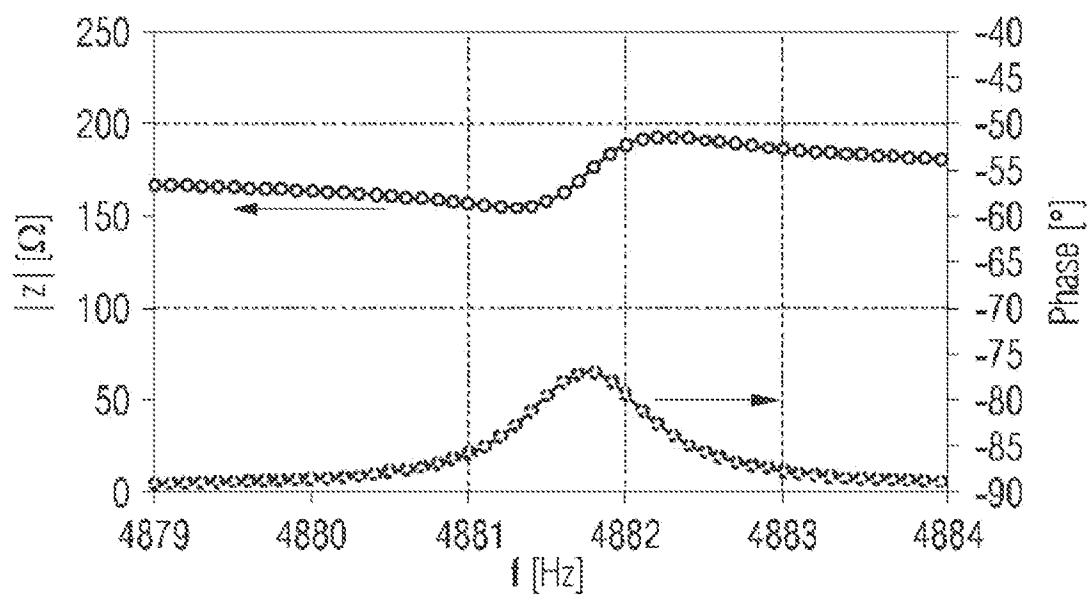
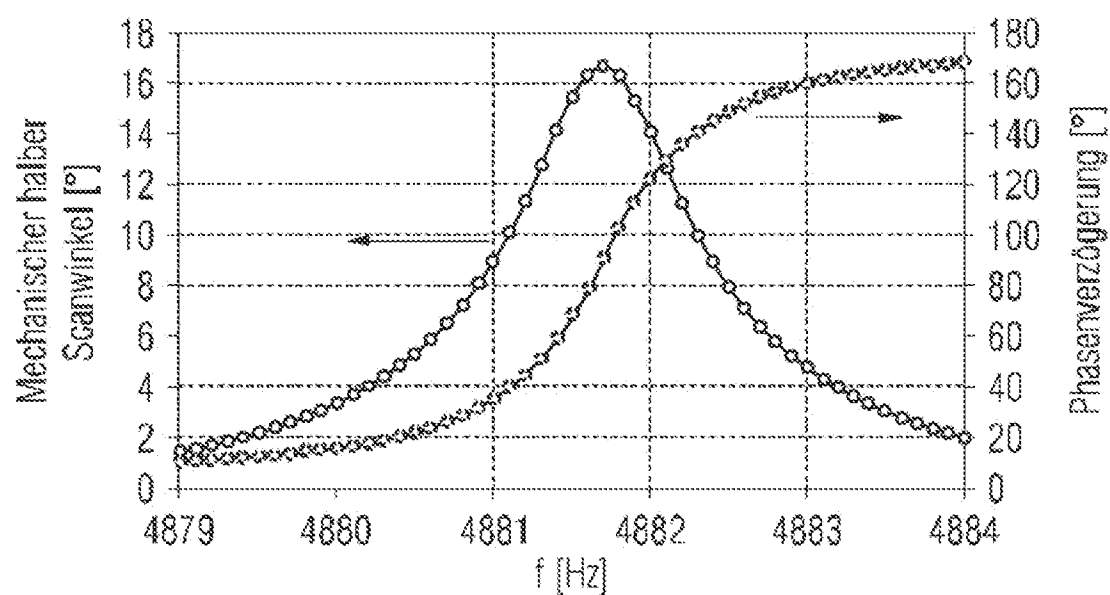


FIG 11D

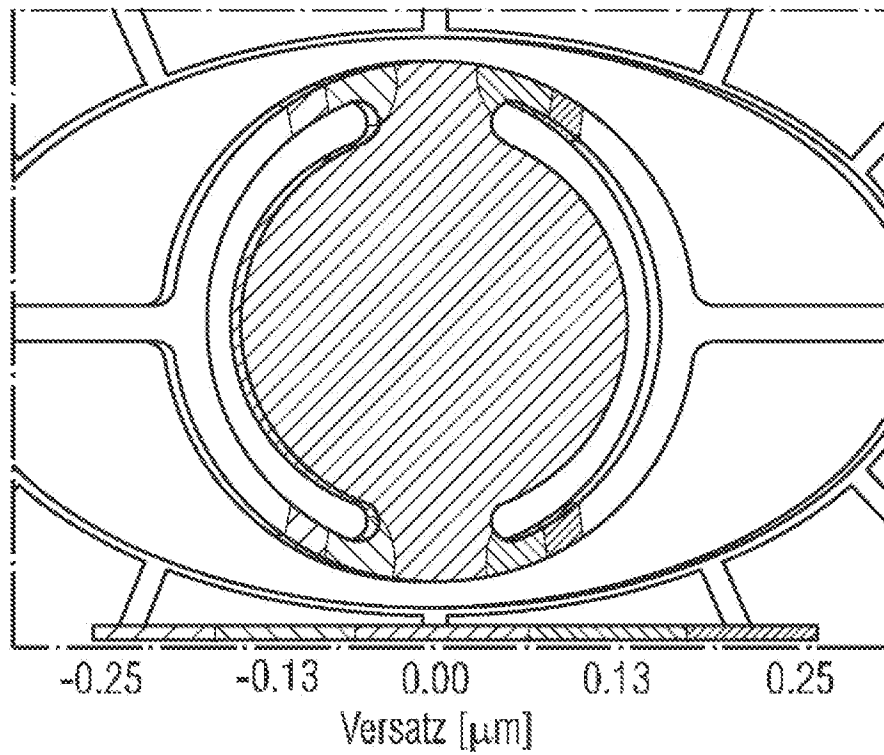


FIG 11E

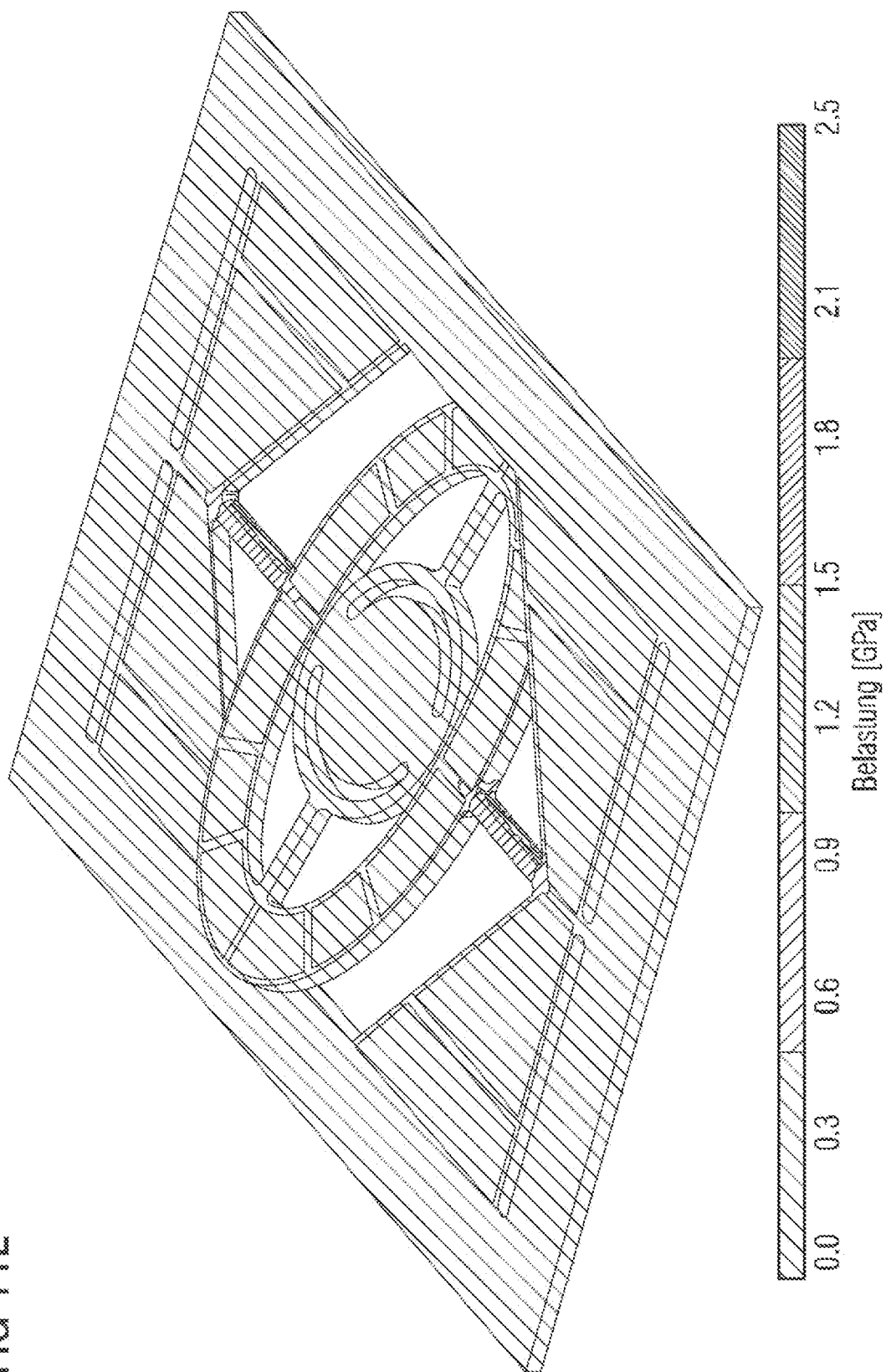


FIG 12A

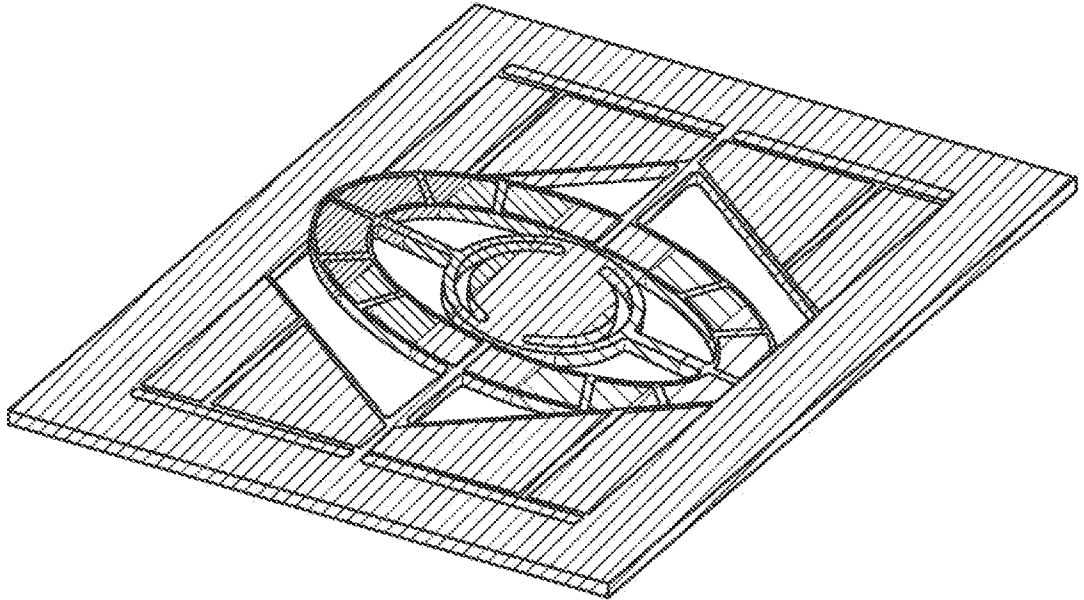


FIG 12B

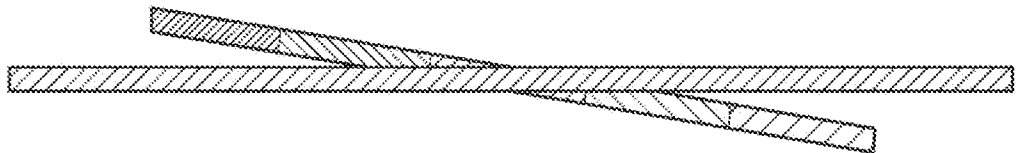


FIG 12C

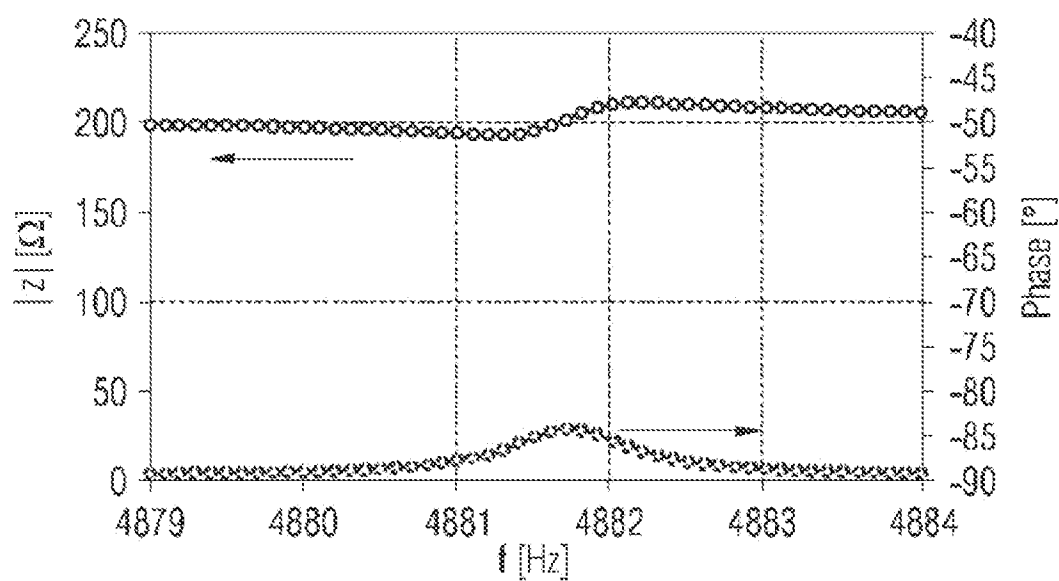
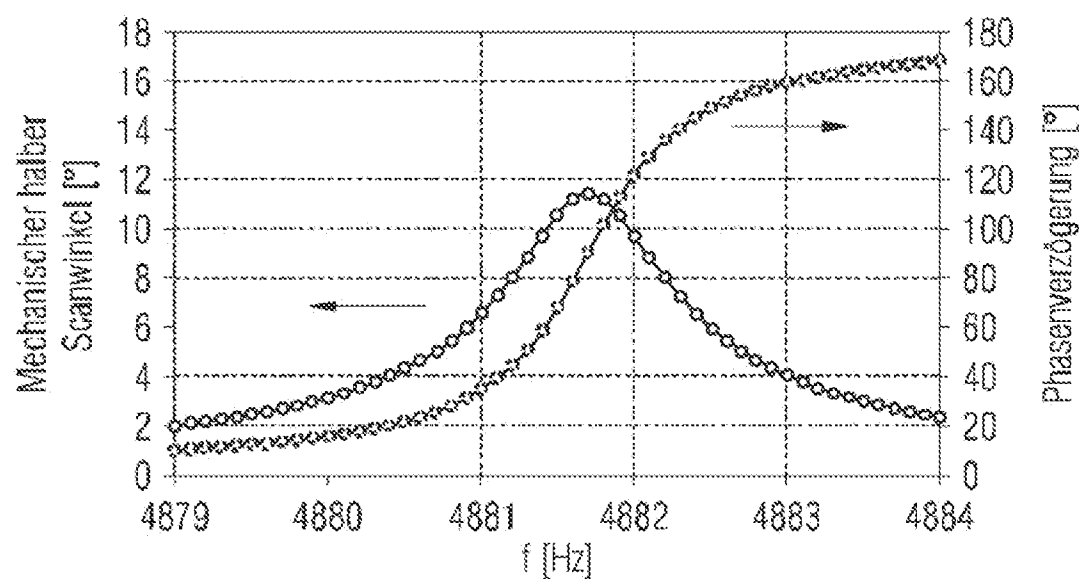


FIG 12D

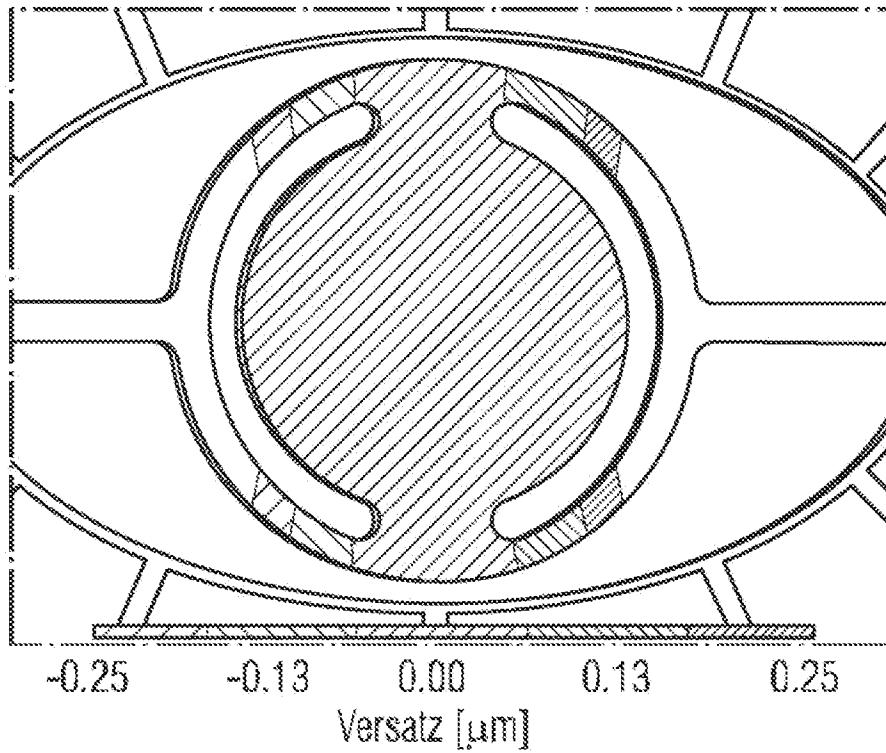


FIG 12E

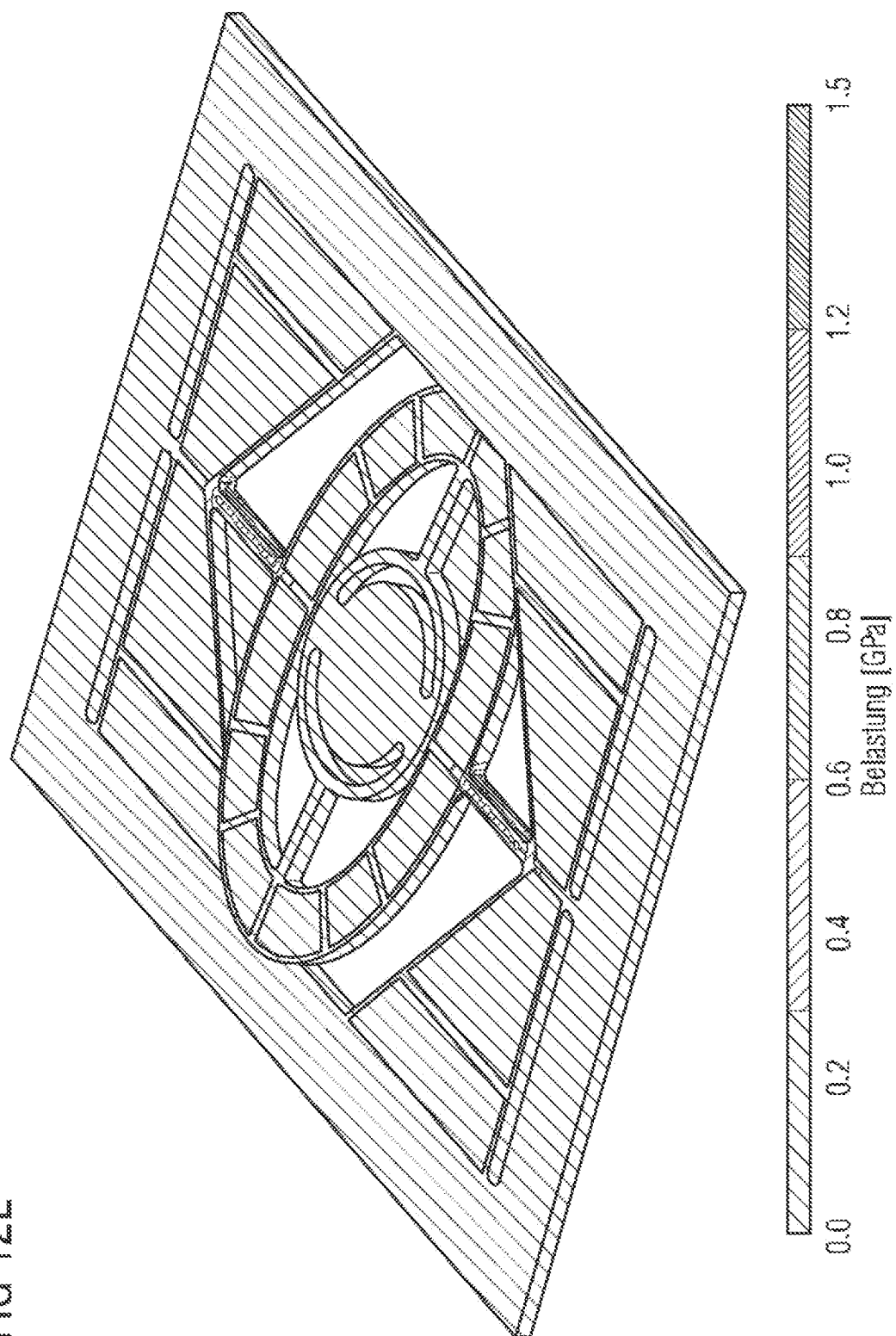


FIG 13A

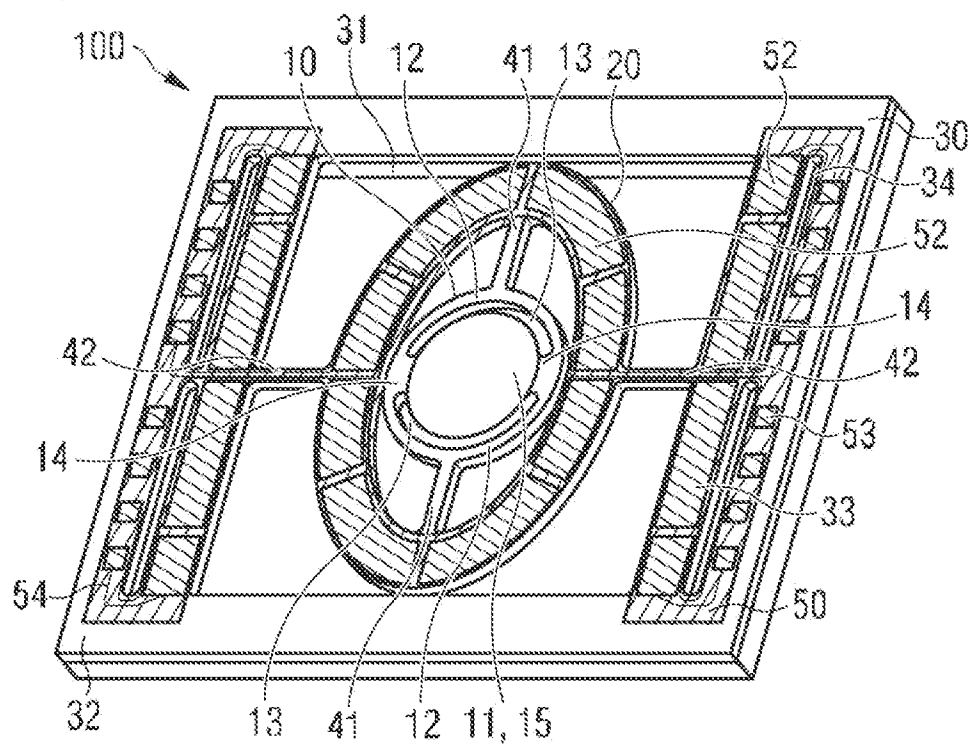


FIG 13B

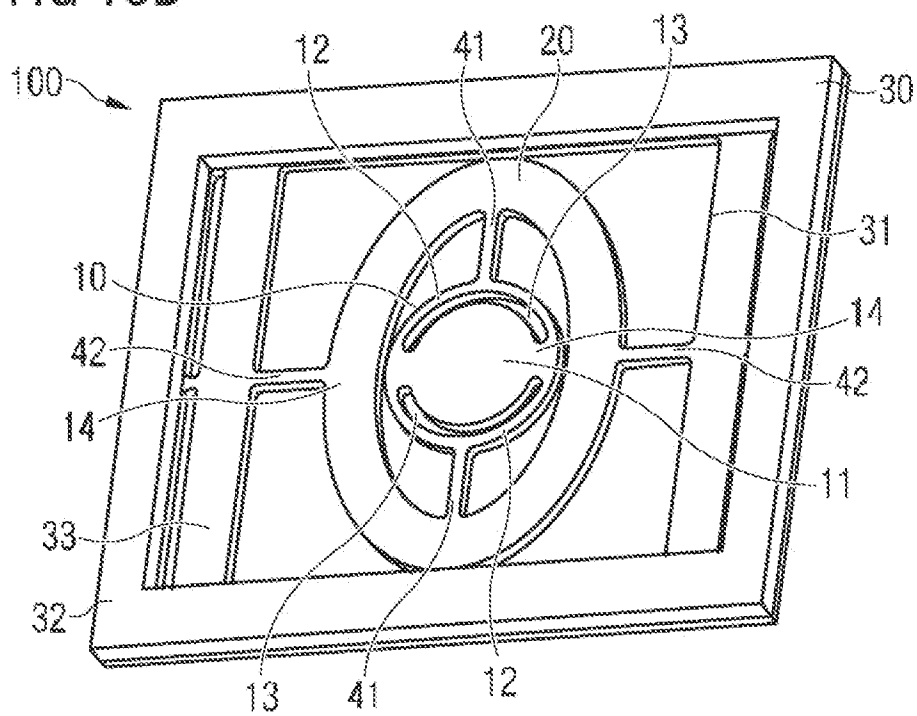


FIG 14A

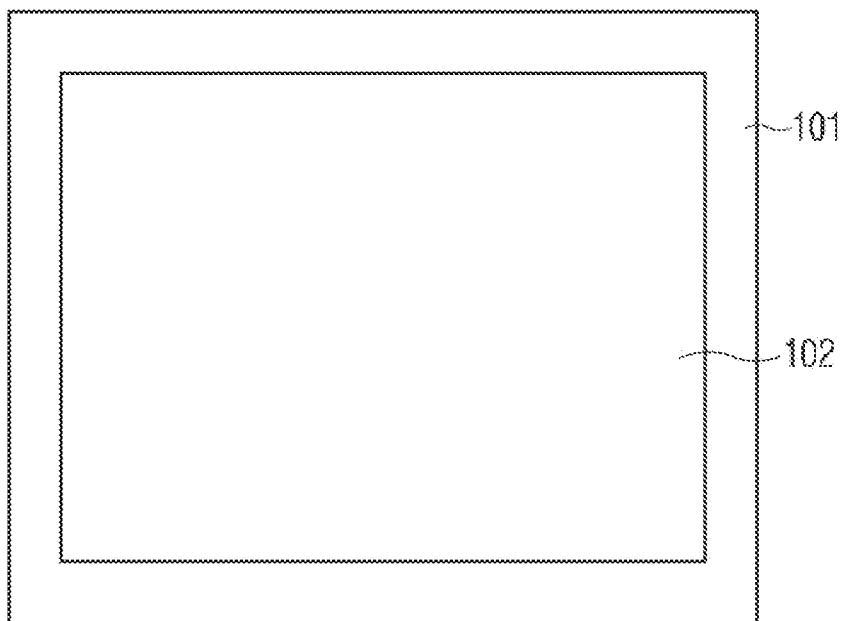


FIG 14B

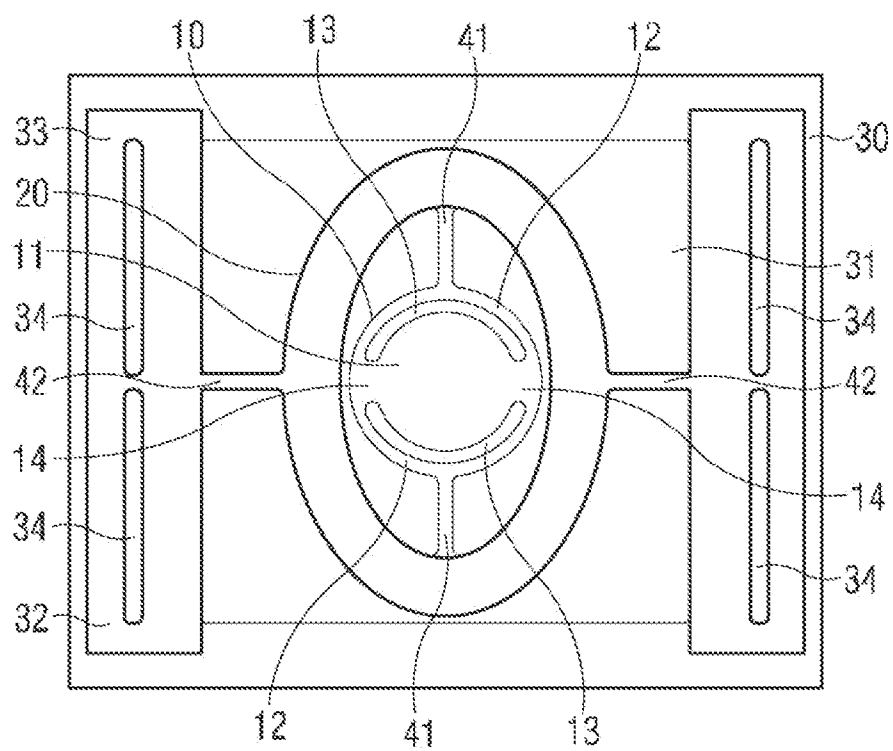


FIG 14C

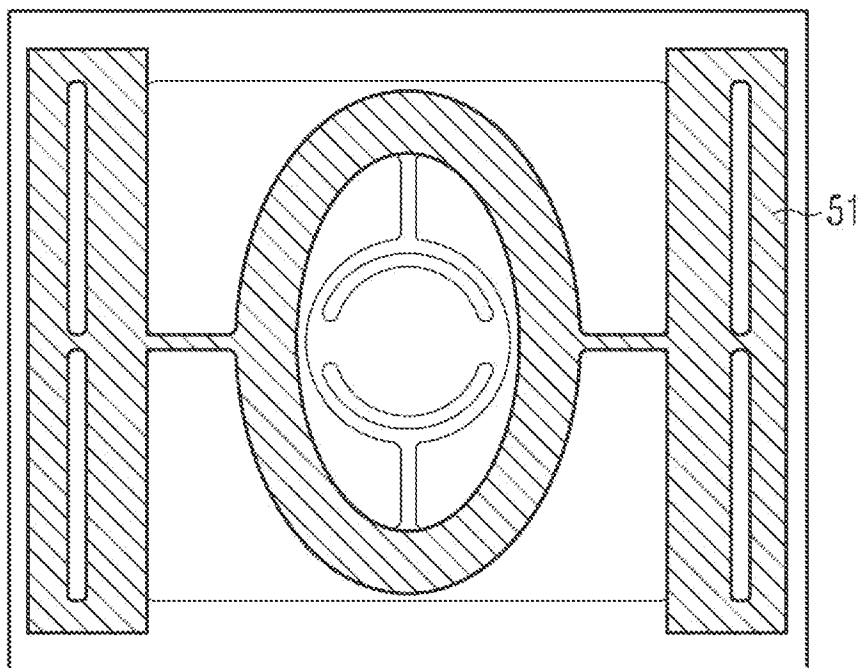


FIG 14D

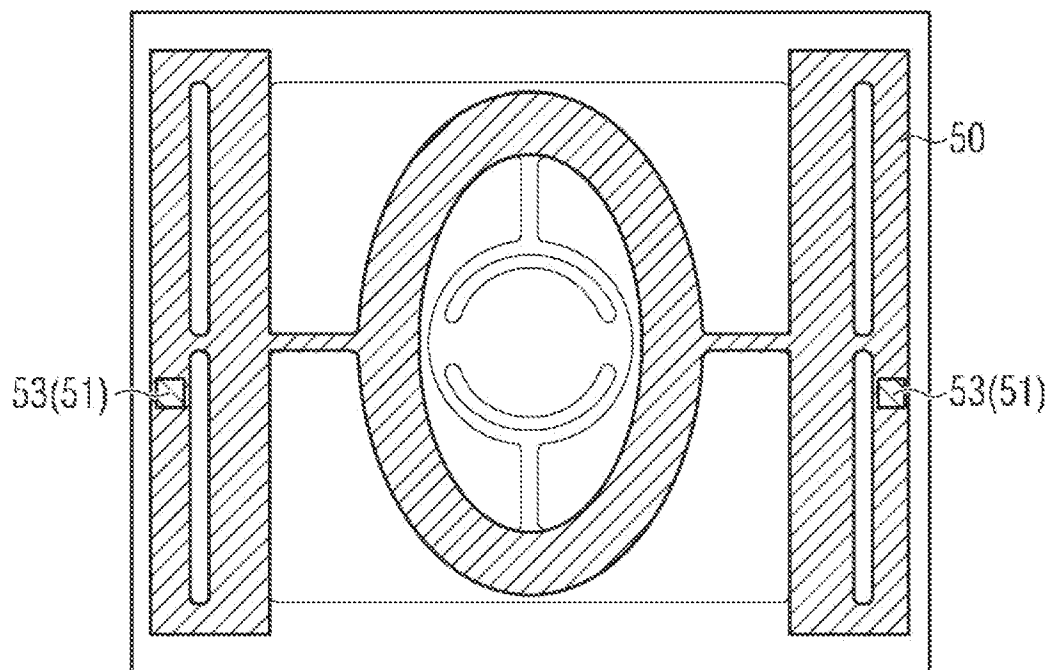


FIG 14E

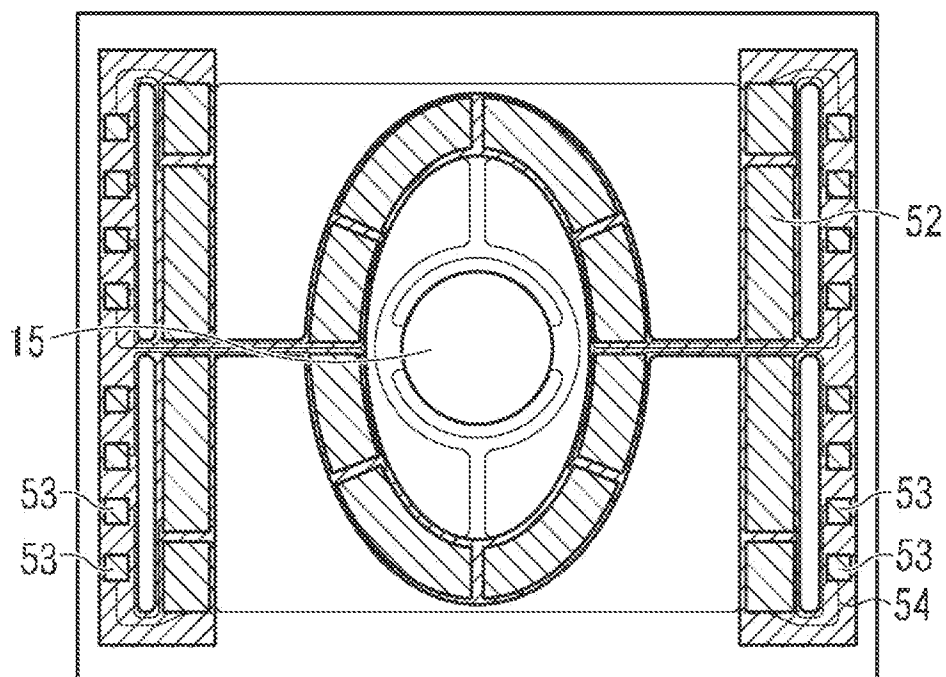


FIG 15

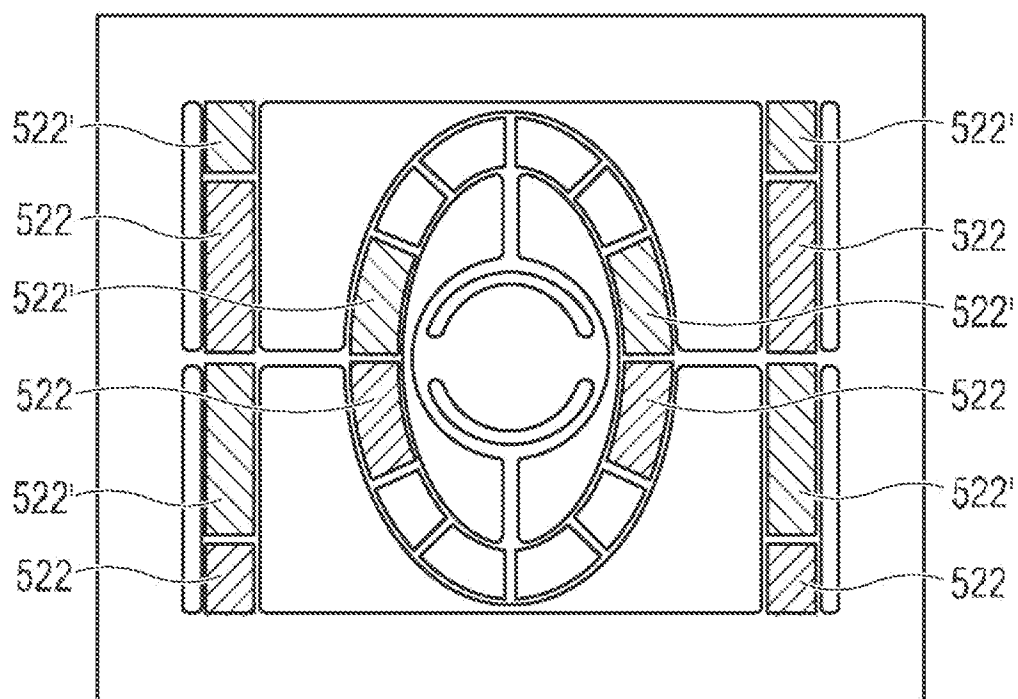


FIG 16A

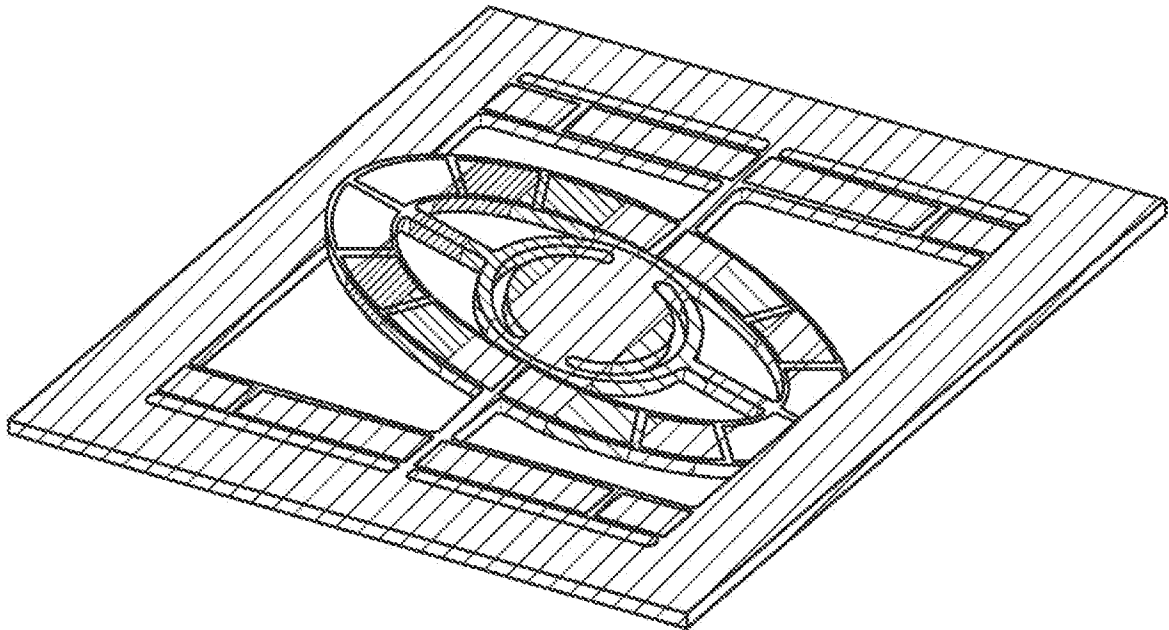


FIG 16B

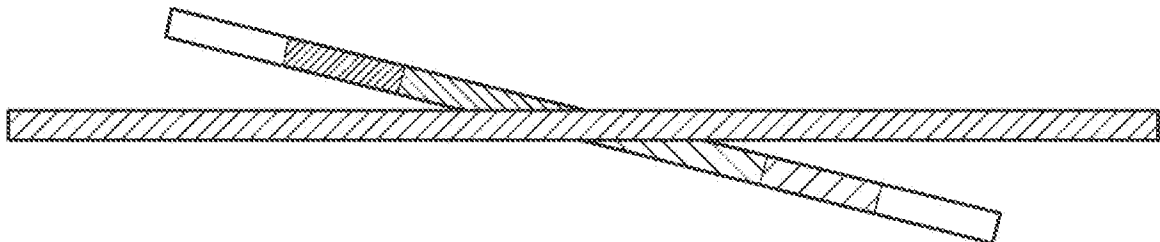


FIG 16C

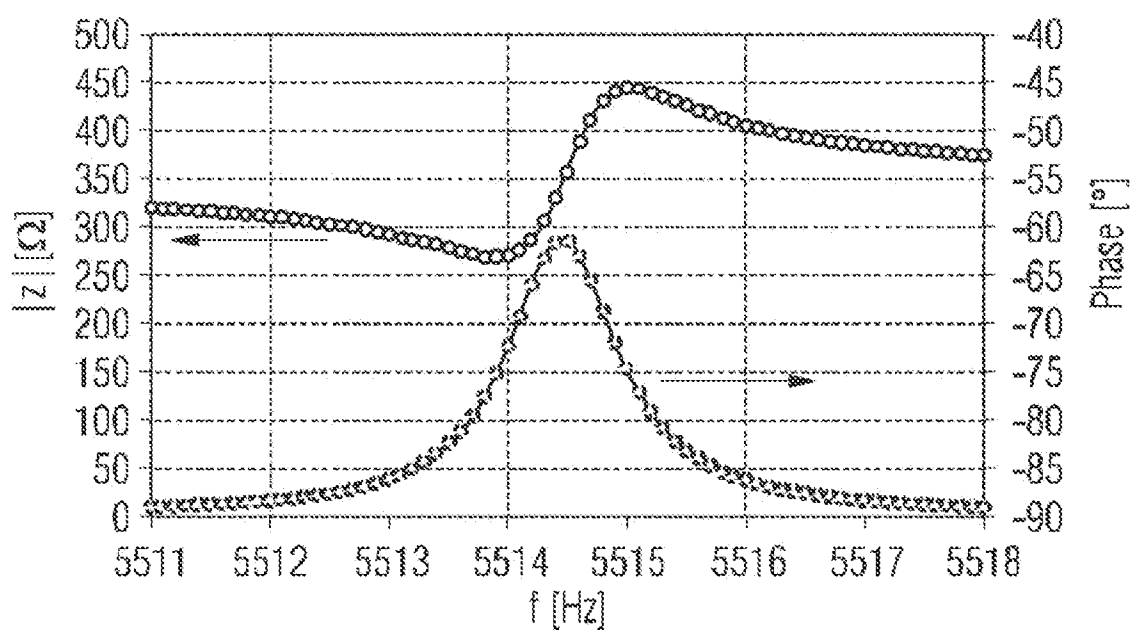
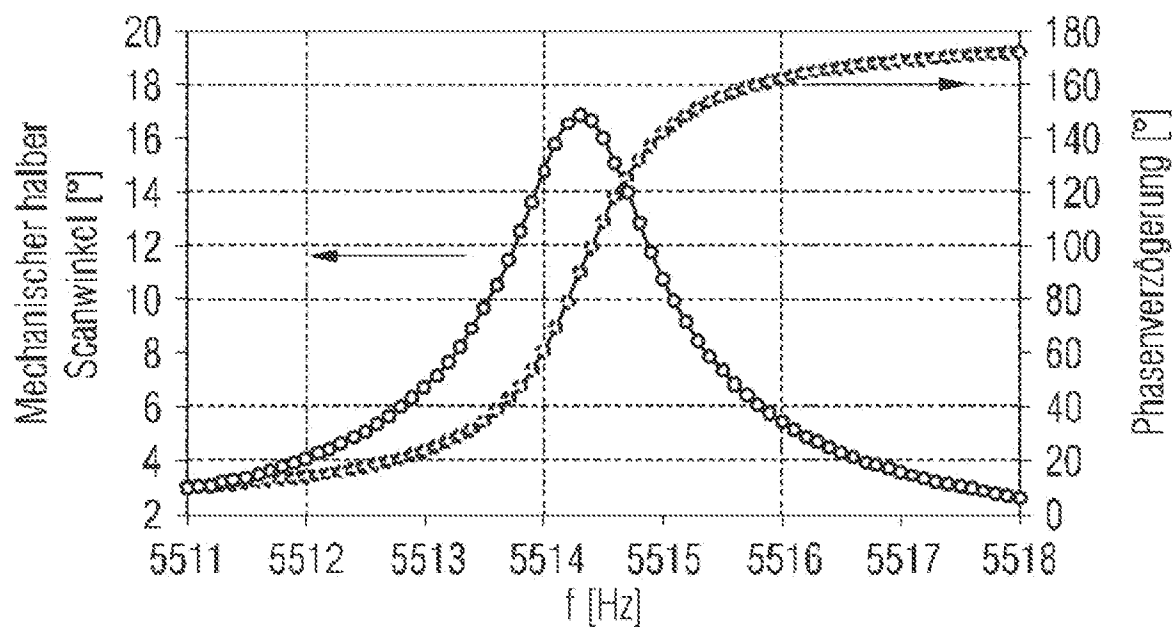


FIG 16D

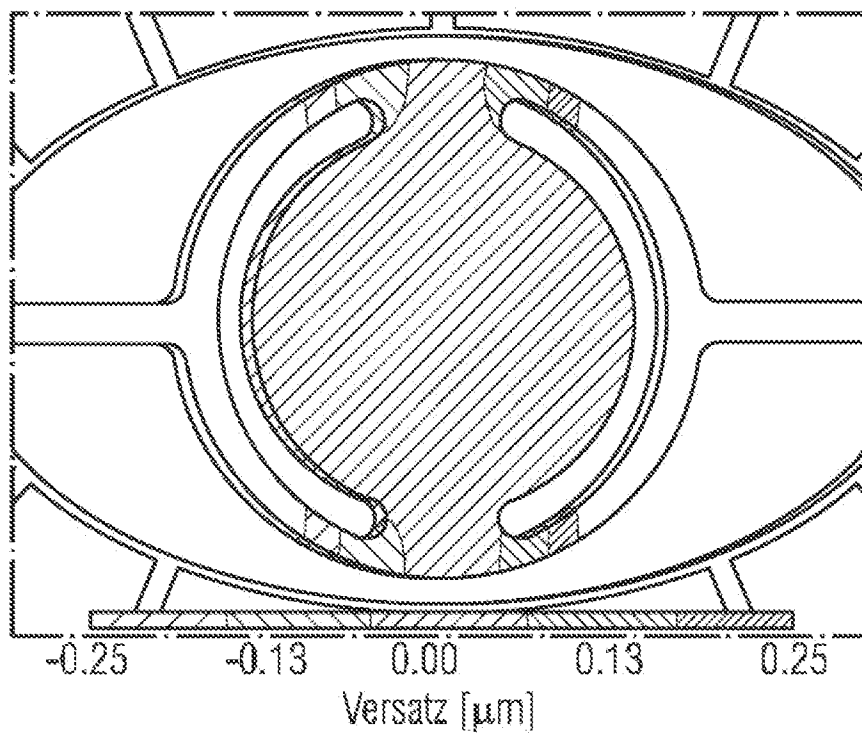


FIG 16E

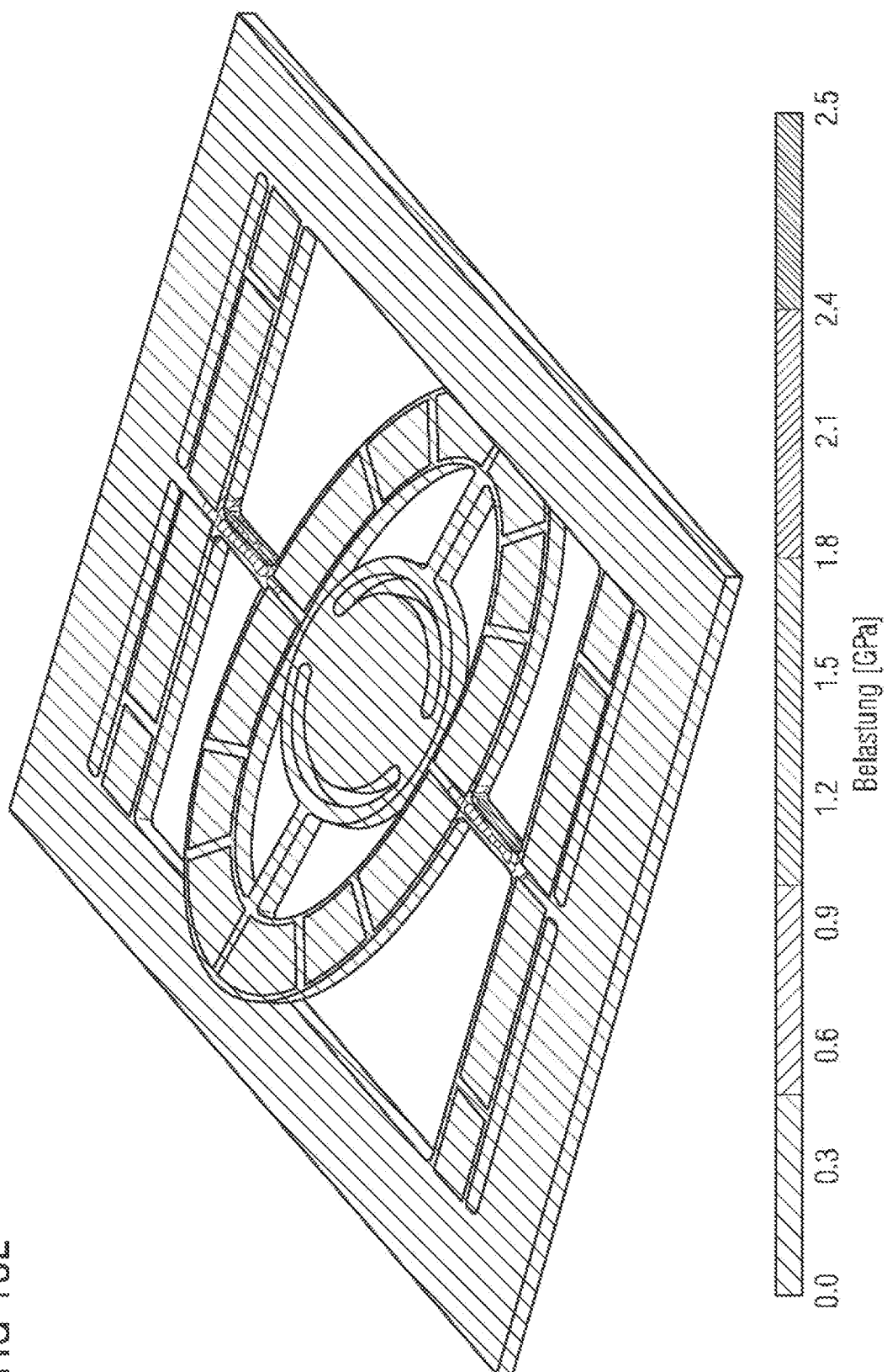


FIG 17

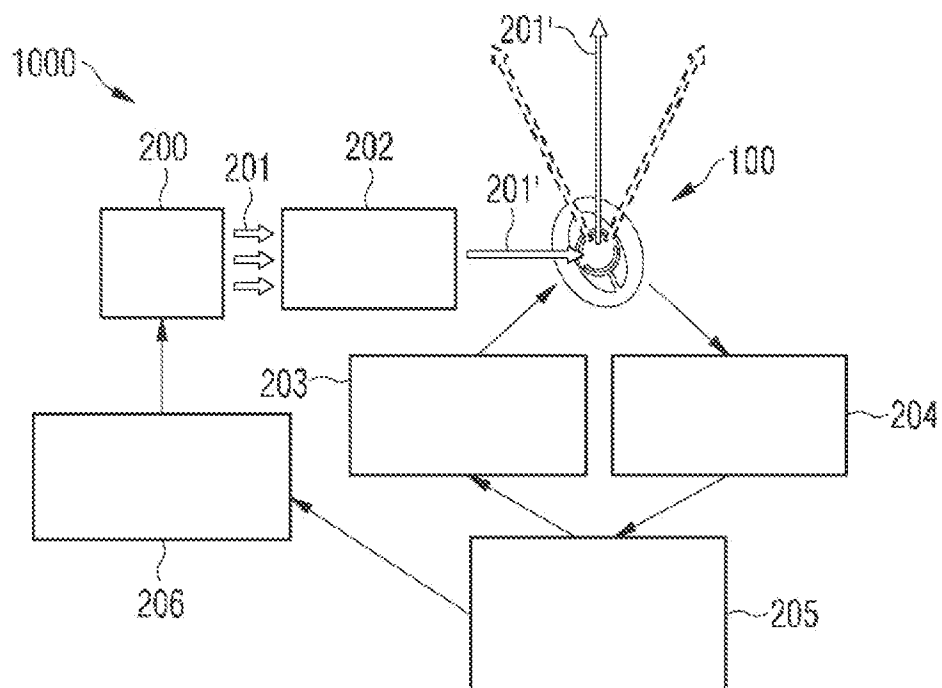


FIG 18A

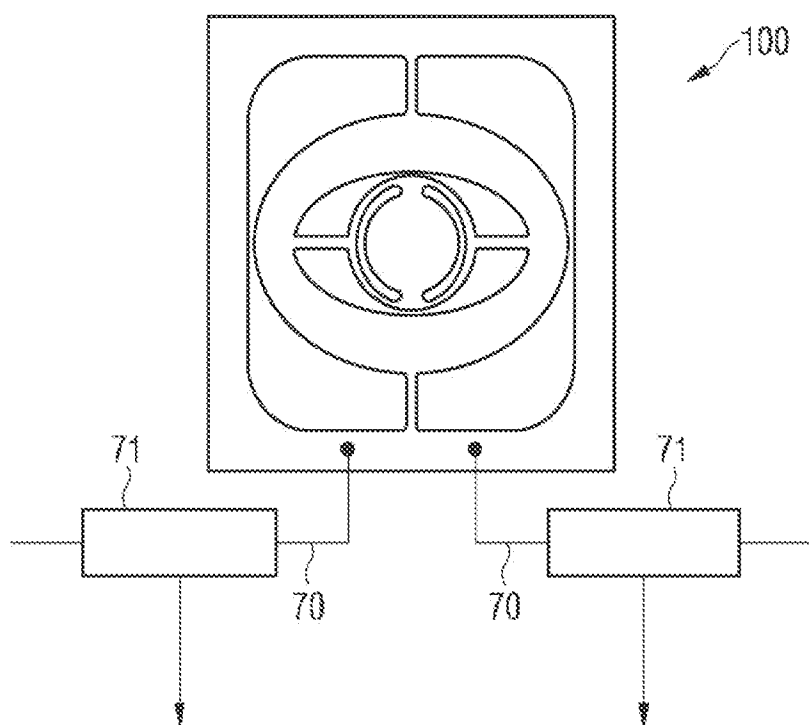


FIG 18B

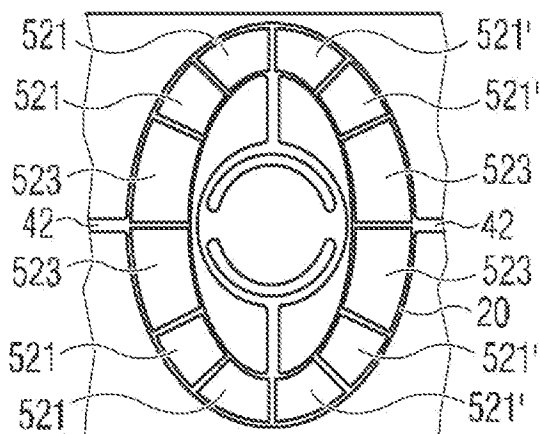


FIG 18C

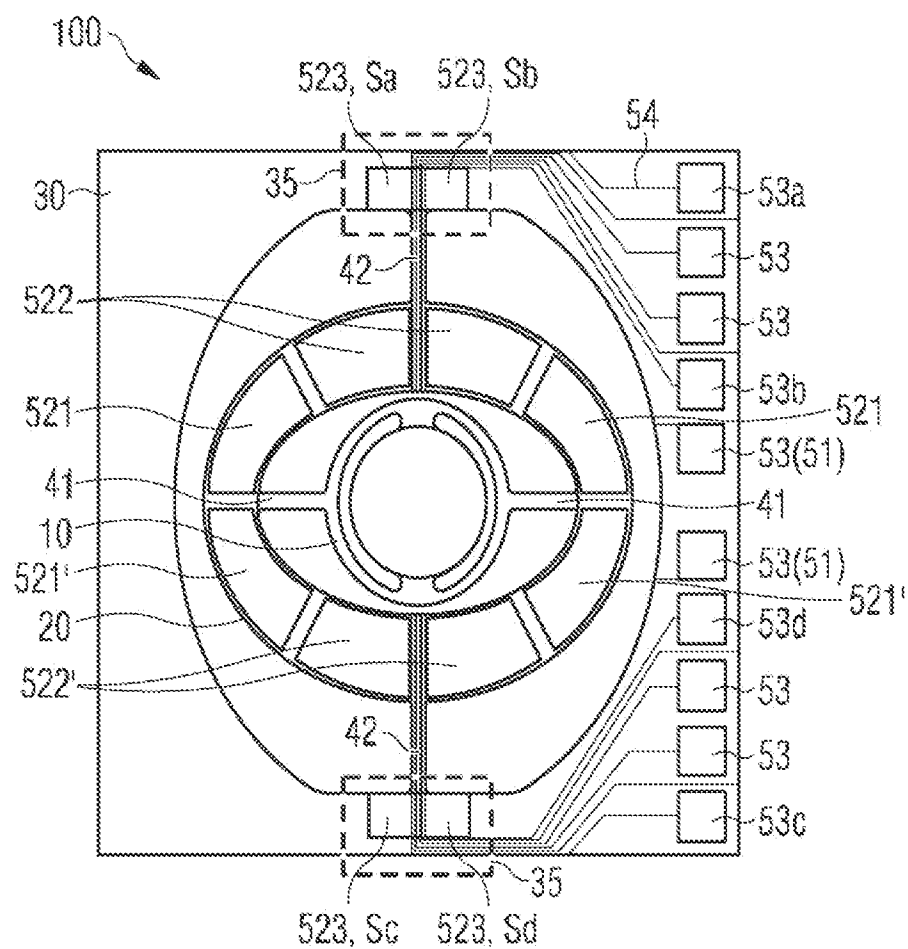


FIG 18D

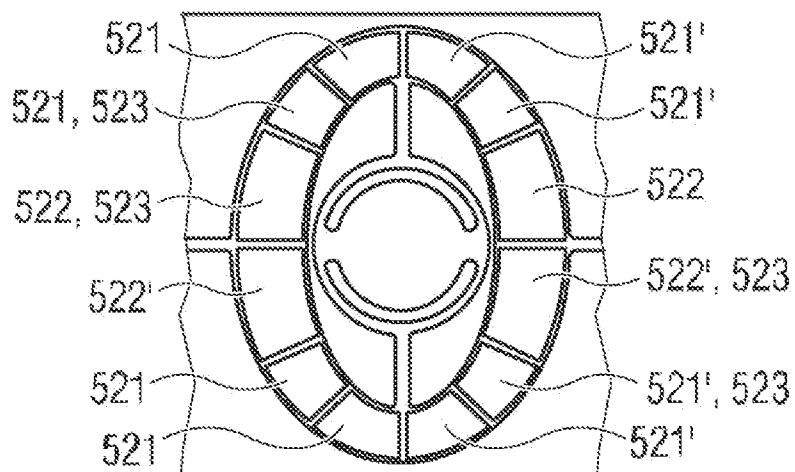


FIG 18E

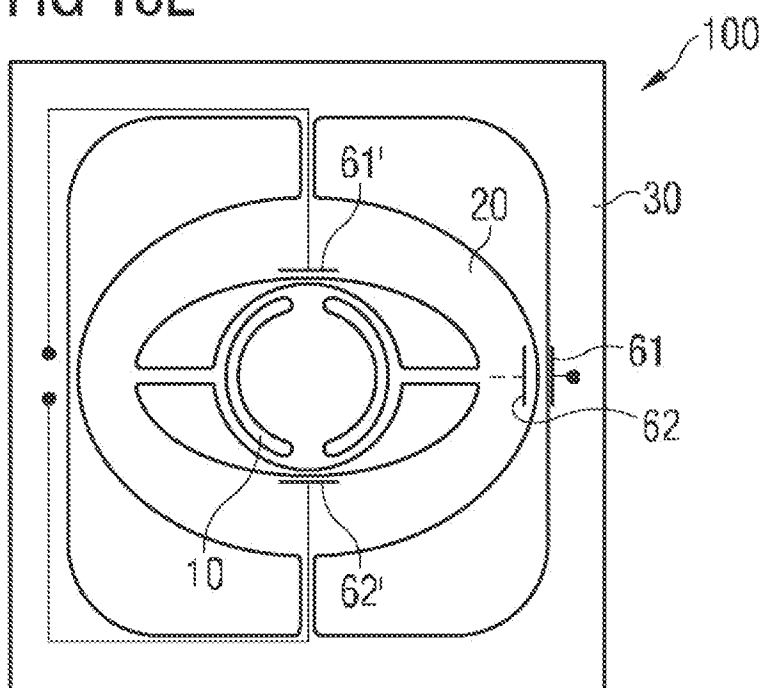


FIG 19A

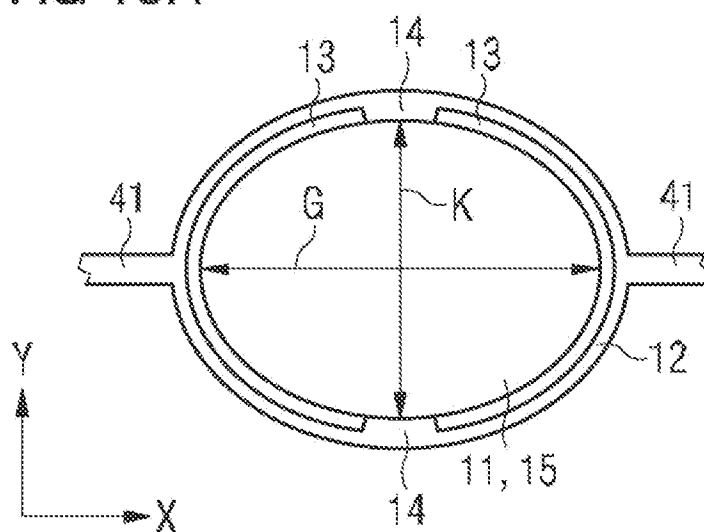


FIG 19B

