

(12)

Gebrauchsmusterschrift

(21) Anmeldenummer: GM 9001/2024
(86) PCT-Anmeldenummer: PCT/EP24054217
(22) Anmeldetag: 20.02.2024
(24) Beginn der Schutzdauer: 15.10.2024
(45) Veröffentlicht am: 15.10.2024

(51) Int. Cl.: **G02B 26/08** (2006.01)
B81B 3/00 (2006.01)

(30) Priorität:
11.04.2023 DE 1102023109108.5 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)

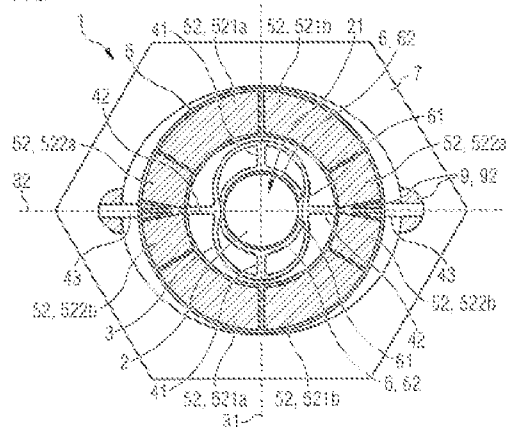
(54) **Mikroelektromechanischer Spiegel, Verfahren zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels, Projektionsvorrichtung und Verwendung eines mikroelektromechanischen Spiegels**

(57) Mikroelektromechanischer Spiegel, Verfahren zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels, Projektionsvorrichtung und Verwendung eines mikroelektromechanischen Spiegels Es wird ein mikroelektromechanischer Spiegel (1) angegeben, aufweisend:

- ein Spiegelement (2),
- eine Torsionsaufhängung (3), die das Spiegelement (2) umschließt und über zwei erste Torsionsfederelemente (41) mit dem Spiegelement (2) verbunden ist.

Des Weiteren werden ein Verfahren zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels, eine Projektionsvorrichtung und eine Verwendung eines mikroelektromechanischen Spiegels angegeben.

FIG 1



Beschreibung

MIKROELEKTROMECHANISCHER SPIEGEL, VERFAHREN ZUM BETRIEB EINES MIKROELEKTROMECHANISCHEN SPIEGELS, PROJEKTIONSVORRICHTUNG UND VERWENDUNG EINES MIKROELEKTROMECHANISCHEN SPIEGELS

[0001] Es werden ein mikroelektromechanischer Spiegel, ein Verfahren zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels und eine Projektionsvorrichtung angegeben.

[0002] Mikroelektromechanische Spiegel werden zum Beispiel in Laserprojektoren zur gezielten Ablenkung eines Laserstrahls verwendet, um statische oder bewegte Bilder darzustellen. Beispielsweise werden Laserprojektoren im Automotivbereich zur Projektion von Informationen auf eine Straßenoberfläche, in HUD Anzeigesystemen (Englisch: „head up display“, Kopf- oben Anzeige) für Matrixausleuchtungen oder für LIDAR Anwendungen (Englisch: „light detection and ranging“, Lichtdetektion und Abstandsmessung) eingesetzt. Dafür wird insbesondere eine hohe Tiefenschärfe benötigt, die Laserprojektoren liefern können. Des Weiteren werden Laserprojektoren zum Beispiel als Hologrammprojektoren, in VR-Brillen (Englisch: „virtual reality“, virtuelle Realität) oder AR-Brillen (Englisch: „augmented reality“, erweiterte Realität) verwendet. Hier wird der abgelenkte Laserstrahl beispielsweise in ein Wellenleiter-Brillenglas eingekoppelt. Dabei bestimmt die Richtung und nicht die Position des Laserstrahls die Position des Bildpunkts für den Betrachter, so dass keine weitere Optik benötigt wird.

[0003] Insbesondere für mobile Anwendungen, beispielsweise im Automotivbereich sowie für VR- oder AR-Brillen, sind Laserprojektoren vorteilhaft, die unempfindlich gegenüber Erschütterungen und kostengünstig herstellbar sind. Ein Laserprojektor weist beispielsweise einen mikroelektromechanischen Spiegel auf, der in zwei Richtungen drehbar ist und einen zeitlich modulierten Laserstrahl ablenkt, um ein Bild im Fernfeld zu erzeugen. Insbesondere befindet sich das projizierte Bild immer im Fokus für einen Betrachter und ein Auge des Betrachters muss nicht akkommodiert werden. Die Druckschrift JP 2008-20701 A beschreibt beispielsweise einen zweidimensionalen optischen Scanner. Die Druckschrift JP 6 506 212 B2 beschreibt einen optischen Deflektor. Die Druckschrift US 10 371 940 B2 beschreibt eine Vorrichtung zum Treiben eines Spiegels und ein zugehöriges Betriebsverfahren. Die Druckschrift DE 10 2021 116 165 B3 beschreibt einen Lissajous-Mikroscanner.

[0004] Zumindest eine Aufgabe von bestimmten Ausführungsformen ist es, einen mikroelektromechanischen Spiegel anzugeben, der eine besonders kompakte Bauform aufweist. Zumindest eine weitere Aufgabe von bestimmten Ausführungsformen ist es, ein Verfahren zum Betrieb eines derartigen mikroelektromechanischen Spiegels anzugeben. Zumindest eine weitere Aufgabe von bestimmten Ausführungsformen ist es, eine Projektionsvorrichtung mit einem mikroelektromechanischen Spiegel anzugeben, der eine besonders kompakte Bauform aufweist.

[0005] Diese Aufgaben werden durch einen mikroelektromechanischen Spiegel, ein Verfahren zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels und eine Projektionsvorrichtung gemäß den unabhängigen Ansprüchen gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen des mikroelektromechanischen Spiegels, des Verfahrens zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels und der Projektionsvorrichtung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben und gehen weiterhin aus der nachfolgenden Beschreibung und den Zeichnungen hervor.

[0006] Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der mikroelektromechanische Spiegel ein Spiegelement auf. Das Spiegelement weist insbesondere eine Haupterstreckungsebene auf. Beispielsweise weist das Spiegelement in Draufsicht auf die Haupterstreckungsebene eine kreisförmige, ovale, quadratische, rechteckige oder polygonale Form auf. Das Spiegelement umfasst beispielsweise ein Substrat mit einer darauf aufgetragenen reflektierenden Schicht. Zum Beispiel weist das Substrat Silizium auf oder besteht aus Silizium. Alternativ oder zusätzlich kann das Substrat Diamant, kubisches Bor-Nitrid (BN), Silizium-Nitrid (SiN), oder Bor aufweisen, oder aus zumindest einem dieser Materialien bestehen. Zum Beispiel weist die reflektierende Schicht ein Metall auf oder besteht aus einem Metall.

[0007] Insbesondere ist die reflektierende Schicht zur Reflexion und/oder zur Umlenkung elektromagnetischer Strahlung in einem Spektralbereich zwischen infrarotem und ultraviolettem Licht eingerichtet. Die reflektierende Schicht erstreckt sich insbesondere in einer Ebene, die der Haupterstreckungsebene des Spiegelements entspricht. Hier und im Folgenden ist die Haupterstreckungsebene in Bezug auf eine Ruheposition des Spiegelements definiert.

[0008] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform weist der mikroelektromechanische Spiegel eine Torsionsaufhängung auf, die das Spiegelement umschließt und über zwei erste Torsionsfederelemente mit dem Spiegelement verbunden ist. Beispielsweise ist das Spiegelement in einem Zentrum der Torsionsaufhängung angeordnet. Insbesondere umschließt die Torsionsaufhängung das Spiegelement in der Haupterstreckungsebene des Spiegelements in einem Ruhezustand des Spiegelements. Die Torsionsaufhängung umfasst beispielsweise ein in der Haupterstreckungsebene ringförmig ausgebildetes Substrat, in dessen Zentrum das Spiegelement angeordnet ist. Zum Beispiel weist das Substrat Silizium auf oder besteht aus Silizium. Im Betrieb des mikroelektromechanischen Spiegels, bei dem insbesondere das Spiegelement bewegt wird, kann die Haupterstreckungsebene des Spiegelements im Verhältnis zur Torsionsaufhängung verdreht sein.

[0009] Jedes der ersten Torsionsfederelemente umfasst insbesondere einen Torsionsbalken oder besteht aus einem Torsionsbalken. Zum Beispiel umfassen die Torsionsfederelemente ein Substrat, das beispielsweise Silizium aufweist oder aus Silizium besteht. Die Torsionsfederelemente weisen beispielsweise jeweils eine langgestreckte, balkenartige Form mit einer Drehachse auf, die insbesondere einer Längsrichtung des jeweiligen Torsionsfederelements entspricht. Im Betrieb wirkt auf die Torsionsfederelemente beispielsweise ein Torsionsmoment in Bezug auf die Drehachse, wodurch sich die Torsionsfederelemente um ihre jeweilige Drehachse verwinden. Dabei baut sich in den Torsionsfederelementen insbesondere ein rückstellendes Torsionsmoment auf.

[0010] Die Drehachsen der zwei ersten Torsionsfederelemente sind bevorzugt entlang einer gemeinsamen ersten Drehachse ausgerichtet. In anderen Worten weisen die zwei ersten Torsionsfederelemente eine gemeinsame erste Drehachse auf, um die sie sich während des Betriebs verwinden. Insbesondere, ist das Spiegelement zumindest innerhalb eines ersten Winkelbereichs um die erste Drehachse relativ zur Torsionsaufhängung drehbar.

[0011] Beispielsweise weisen das Spiegelement, die Torsionsaufhängung und die ersten Torsionsfederelemente das gleiche Substrat auf. In anderen Worten sind die vorgenannten Elemente einstückig ausgebildet und/oder monolithisch integriert.

[0012] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform weist der mikroelektromechanische Spiegel einen piezoelektrischen Antriebsring auf, der die Torsionsaufhängung umgibt und über zwei zweite Torsionsfederelemente mit der Torsionsaufhängung verbunden ist. Beispielsweise ist die Torsionsaufhängung im Zentrum des Antriebsrings angeordnet. Der Antriebsring ist insbesondere dazu eingerichtet, das Spiegelement im Betrieb des mikroelektromechanischen Spiegels aus seiner Ruheposition auszulenken. Dabei wird die Torsionsaufhängung und/oder das Spiegelement bevorzugt relativ zum Antriebsring verdreht. Beispielsweise werden im Antriebsring mechanische Verspannungen erzeugt, die über die zweiten Torsionsfederelemente ein Biegemoment und/oder ein Drehmoment auf die Torsionsaufhängung übertragen.

[0013] Der Antriebsring umfasst beispielsweise ein Substrat, das Silizium aufweist oder aus Silizium besteht, auf dem zumindest stellenweise eine piezoelektrische Schicht aufgebracht ist. Die piezoelektrische Schicht ist insbesondere parallel zur Haupterstreckungsebene des Spiegelements angeordnet.

[0014] Die piezoelektrische Schicht ist zum Beispiel zwischen einer ersten Elektrode und einer zweiten Elektrode angeordnet. Die piezoelektrische Schicht kann ein oder mehrere piezoelektrische Materialien aufweisen. Beispielsweise weist die piezoelektrische Schicht ein piezoelektrisches Material auf, wie zum Beispiel Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), Aluminium-Nitrid (AlN), oder Bismut-Ferrat Barium-Titanat (BFO-BT), oder besteht aus einem solchen Material. Durch Anle-

gen einer elektrischen Spannung an die Elektroden erzeugt die piezoelektrische Schicht insbesondere die mechanischen Verspannungen im Antriebsring.

[0015] Jedes der zweiten Torsionsfederelemente umfasst insbesondere einen Torsionsbalken oder besteht aus einem Torsionsbalken. Zum Beispiel umfassen die Torsionsfederelemente ein Substrat, das beispielsweise Silizium aufweist oder aus Silizium besteht. Die Torsionsfederelemente weisen beispielsweise jeweils eine langgestreckte, balkenartige Form mit einer Drehachse auf, die insbesondere einer Längsrichtung des jeweiligen Torsionsfederelements entspricht. Im Betrieb wirkt auf die Torsionsfederelemente beispielsweise ein Torsionsmoment in Bezug auf die Drehachse, wodurch sich die Torsionsfederelemente um ihre jeweilige Drehachse verwinden. Dabei baut sich in den Torsionsfederelementen insbesondere ein rückstellendes Torsionsmoment auf.

[0016] Die Drehachsen der zwei zweiten Torsionsfederelemente sind bevorzugt entlang einer gemeinsamen zweiten Drehachse ausgerichtet. In anderen Worten weisen die zwei zweiten Torsionsfederelemente eine gemeinsame zweite Drehachse auf, um die sie sich während des Betriebs verwinden. Insbesondere, ist die Torsionsaufhängung und somit das Spiegelement zumindest innerhalb eines zweiten Winkelbereichs um die zweite Drehachse relativ zum Antriebsring drehbar. Die zweite Drehachse ist beispielsweise quer oder orthogonal zur ersten Drehachse.

[0017] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels weist die Torsionsaufhängung eine langgestreckte Form mit einer langen Achse und einer dazu senkrechten kurzen Achse auf. Die lange Achse und die kurze Achse sind beispielsweise Symmetrieachsen der Torsionsaufhängung. Insbesondere weist die Torsionsaufhängung in Richtung der langen Achse eine größere räumliche Ausdehnung auf als in Richtung der kurzen Achse auf. In anderen Worten ist ein Durchmesser der Torsionsaufhängung in Richtung der langen Achse größer als ein Durchmesser der Torsionsaufhängung in Richtung der kurzen Achse. Beispielsweise ist der Durchmesser der Torsionsaufhängung in Richtung der langen Achse um zumindest 5% größer, bevorzugt um zumindest 20% größer, und besonders bevorzugt um zumindest 40% größer, als der Durchmesser in Richtung der kurzen Achse. Die lange Achse und die kurze Achse liegen beispielsweise in der Haupterstreckungsebene des Spiegelements.

[0018] Die erste Drehachse stimmt beispielsweise mit der langen Achse überein, während die zweite Drehachse beispielsweise mit der kurzen Achse übereinstimmt. Das Spiegelement ist im Betrieb des mikroelektromechanischen Spiegels daher insbesondere bezüglich der kurzen Achse und bezüglich der langen Achse relativ zum Antriebsring zumindest teilweise drehbar.

[0019] Durch die langgestreckte Form der Torsionsaufhängung weist zumindest eine Schwingungsmoden des Spiegelements und/oder der Torsionsaufhängung insbesondere eine geringere Anharmonizität auf als eine entsprechende Schwingungsmoden einer Torsionsaufhängung, die keine langgestreckte Form aufweist. Hier und im Folgenden beschreibt die Anharmonizität insbesondere eine Abhängigkeit einer Resonanzfrequenz der Schwingungsmoden von einer Amplitude der Schwingungsmoden. In anderen Worten ist die Anharmonizität umso größer, je größer eine Verschiebung der Resonanzfrequenz ist, wenn die Amplitude der Schwingungsmoden erhöht wird.

[0020] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der mikroelektromechanische Spiegel:

- das Spiegelement,
- die Torsionsaufhängung, die das Spiegelement umschließt und über die zwei ersten Torsionsfederelemente mit dem Spiegelement verbunden ist.

[0021] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform umfasst der mikroelektromechanische Spiegel:

- das Spiegelement,
- die Torsionsaufhängung, die das Spiegelement umschließt und über die zwei ersten Torsionsfederelemente mit dem Spiegelement verbunden ist,
- den piezoelektrischen Antriebsring, der die Torsionsaufhängung umgibt und über die zwei zwei-

ten Torsionsfederelemente mit der Torsionsaufhängung verbunden ist, wobei

- die Torsionsaufhängung eine langgestreckte Form mit einer langen Achse und einer dazu senkrechten kurzen Achse aufweist.

[0022] Dem hier beschriebenen mikroelektromechanischen Spiegel liegt insbesondere die Idee zugrunde, zwei unterschiedliche Schwingungsmoden bei denen sich das Spiegelement um jeweils eine der zwei Drehachsen dreht, über nur einen einzelnen Antriebsring anzuregen. Dadurch ist der mikroelektromechanische Spiegel besonders kompakt. Des Weiteren weist eine Schwingungsmoden, bei der sich das Spiegelement um die lange Achse dreht, durch die langgestreckte Form der Torsionsaufhängung vorteilhaft eine besonders geringe Anharmonizität auf.

[0023] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels sind die ersten Torsionsfederelemente entlang der langen Achse angeordnet. Insbesondere ist die erste Drehachse oder eine Verwindungsachse der ersten Torsionsfederelemente entlang der langen Achse der Torsionsaufhängung ausgerichtet.

[0024] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels sind die zweiten Torsionsfederelemente entlang der kurzen Achse angeordnet. Insbesondere ist die zweite Drehachse oder eine Verwindungsachse der zweiten Torsionsfederelemente entlang der kurzen Achse der Torsionsaufhängung ausgerichtet.

[0025] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels sind die zwei ersten Torsionsfederelemente auf gegenüberliegenden Seiten des Spiegelements angeordnet. Dadurch wird beispielsweise eine mechanische Stabilität der Aufhängung des Spiegelements verbessert.

[0026] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels sind die zwei zweiten Torsionsfederelemente auf gegenüberliegenden Seiten der Torsionsaufhängung angeordnet. Dadurch wird beispielsweise eine mechanische Stabilität der Aufhängung der Torsionsaufhängung verbessert.

[0027] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels weist die Torsionsaufhängung eine elliptische Ringform oder die Form eines eingedrückten Ovalrings auf. Beispielsweise hat ein äußerer Umfang der Torsionsaufhängung die Form einer Ellipse oder eines eingedrückten Ovals. Zum Beispiel entspricht eine große Halbachse der Ellipse der langen Achse der Torsionsaufhängung, während eine kleine Halbachse der Ellipse der kurzen Achse der Torsionsaufhängung entspricht. Zum Beispiel entsprechen die lange Achse und die kurze Achse der Torsionsaufhängung zwei Symmetrieachsen des eingedrückten Ovals.

[0028] Beim eingedrückten Oval weist beispielsweise ein Abstand zwischen dem Umfang der Torsionsaufhängung und der langen Achse ein lokales Minimum an der kurzen Achse auf. Dabei entspricht der Abstand von der langen Achse insbesondere einem Abstand in einer Richtung senkrecht zur langen Achse. In anderen Worten weist der Umfang der Torsionsaufhängung an der kurzen Achse eine Einschnürung auf. Zum Beispiel hat der Umfang der Torsionsaufhängung die Form einer Cassinischen Kurve.

[0029] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels weist die Torsionsaufhängung keine piezoelektrischen Antriebselemente auf und/oder die Torsionsaufhängung besteht aus dem Substrat. Beispielsweise ist die Torsionsaufhängung ein passives Element. Insbesondere ist die Torsionsaufhängung bestimmungsgemäß nicht zur Umwandlung von elektrischer Energie in Bewegungsenergie eingerichtet. Im Gegensatz dazu ist der Antriebsring ein aktives Element und bestimmungsgemäß zur Umwandlung elektrischer Energie in Bewegungsenergie eingerichtet.

[0030] Zum Beispiel besteht die Torsionsaufhängung aus dem Substrat. In einer Ausführungsform kann auf dem Substrat der Torsionsaufhängung nur ein Sensorelement oder mehrere Sensorelemente aufgebracht sein, wobei es sich bei dem Sensorelement beziehungsweise bei den Sensorelementen um piezoelektrische Elemente handeln kann, und wobei auf der Torsionsaufhängung kein Antriebselement angeordnet ist. Das Sensorelement ist beispielsweise zur Erfassung eines Bewegungszustandes des Spiegelements eingerichtet. Das Sensorelement ist be-

stimmungsgemäß nicht dazu eingerichtet, das Spiegelement aus seiner Ruheposition auszu-
lenken.

[0031] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spie-
gels sind das Spiegelement und die ersten Torsionsfederelemente über ein Verbindungsele-
ment miteinander verbunden. Das Verbindungselement ist insbesondere zu einer mechanischen
Verbindung des Spiegelements mit den ersten Torsionsfederelementen eingerichtet. Insbeson-
dere ist das Verbindungselement derart gestaltet, dass sich die Haupterstreckungsebene des
Spiegelements bei einer Schwingung des Spiegelements um die zwei Drehachsen so wenig
als möglich verbiegt oder verformt. Dadurch können im Betrieb des mikroelektromechanischen
Spiegels zum Beispiel Abbildungsfehler verringert werden. Beispielsweise reduziert das Verbin-
dungselement die Übertragung einer Verwindung der ersten Torsionsfederelemente auf das
Spiegelement. Das Verbindungselement umfasst insbesondere ein Substrat, das beispiele-
weise Silizium aufweist oder aus Silizium besteht.

[0032] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spie-
gels ist das Verbindungselement kreisringförmig ausgebildet und über zwei Aufhängungspunkte
mit dem Spiegelement verbunden. Insbesondere ist das Spiegelement im Zentrum des Ver-
bindungselements angeordnet. Das Verbindungselement erstreckt sich zum Beispiel in der
Haupterstreckungsebene des Spiegelements.

[0033] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spie-
gels sind die zwei Aufhängungspunkte auf gegenüberliegenden Seiten des Spiegelements ent-
lang der kurzen Achse angeordnet. Insbesondere sind die Aufhängungspunkte um 90° relativ zur
ersten Drehachse der ersten Torsionsfederelemente verdreht.

[0034] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spie-
gels weist das Verbindungselement zwei voneinander getrennte kreisbogenförmige Segmente
auf, die jeweils mit einem der zwei ersten Torsionsfederelemente verbunden sind.

[0035] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spie-
gels ist jedes der kreisbogenförmigen Segmente über zwei Aufhängungspunkte mit dem Spie-
gelement verbunden. Die Aufhängungspunkte sind beispielsweise an den jeweiligen Enden der
kreisbogenförmigen Segmente angeordnet. Die ersten Torsionsfederelemente sind zum Beispiel
zwischen den beiden Aufhängungspunkten mit dem jeweiligen kreisbogenförmigen Segment ver-
bunden.

[0036] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spie-
gels ist der Antriebsring kreisringförmig ausgebildet. Gemäß einer weiteren Ausführungsform des
mikroelektromechanischen Spiegels ist der Antriebsring in der Haupterstreckungsebene des
Spiegelements in Ruhelage angeordnet. Insbesondere sind die Torsionsaufhängung und das
Spiegelement im Zentrum des Antriebsringes angeordnet.

[0037] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spie-
gels ist der Antriebsring über zwei dritte Torsionsfederelemente mit einem Rahmen verbunden.
Beispielsweise umschließt der Rahmen den Antriebsring in der Haupterstreckungsebene des
Spiegelements vollständig. Der Rahmen umfasst insbesondere ein Substrat, das beispiele-
weise Silizium aufweist oder aus Silizium besteht. Die dritten Torsionsfederelemente weisen bei-
spielsweise eine ähnliche oder gleiche Struktur wie die zweiten Torsionsfederelemente auf, oder
sind gleich oder ähnlich zu den zweiten Torsionsfederelementen ausgebildet.

[0038] Beispielsweise sind auf dem Rahmen elektrische Kontaktstellen zu einer externen elektri-
schen Kontaktierung des mikroelektromechanischen Spiegels angeordnet. Die elektrischen Kon-
taktstellen sind beispielsweise über Leiterbahnen mit dem piezoelektrischen Antriebsring
elektrisch verbunden. Die Leiterbahnen sind insbesondere auf den dritten Torsionsfederelemen-
ten angeordnet. Alternativ oder zusätzlich kann der piezoelektrische Antriebsring über Bond-
drähte mit den elektrischen Kontaktstellen elektrisch verbunden sein. Durch die geringe Bewe-
gung des Antriebsringes ist insbesondere eine mechanische Belastung der Bonddrähte gering.

[0039] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spie-

gels sind die zwei dritten Torsionsfederelemente auf gegenüberliegenden Seiten des Antriebsringes entlang der kurzen Achse angeordnet. Beispielsweise sind sowohl die zweiten Torsionsfederelemente als auch die dritten Torsionsfederelemente entlang der kurzen Achse ausgerichtet.

[0040] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels sind das Spiegelement, die Torsionsaufhängung, der Antriebsring, der Rahmen und die Torsionsfederelemente als einstückiges Bauteil ausgebildet. In anderen Worten sind das Spiegelement, die Torsionsaufhängung, der Antriebsring, der Rahmen und die Torsionsfederelemente monolithisch integriert und/oder aus einem gemeinsamen Substrat gebildet. Beispielsweise ist das Substrat monokristallin. Darüber hinaus kann auch das Verbindungselement zwischen den ersten Torsionsfederelementen und dem Spiegelement mit den oben genannten Elementen einstückig ausgebildet sein. Beispielsweise wird bei der Herstellung des mikroelektromechanischen Spiegels das gemeinsame Substrat derart strukturiert, dass die oben genannten Elemente in dem gemeinsamen Substrat ausgebildet werden.

[0041] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels weisen alle Elemente des einstückigen Bauteils ein gemeinsames Substrat auf, das eine konstante Dicke hat. Hier und im Folgenden beschreibt die Dicke eine räumliche Ausdehnung des Substrats in einer Richtung senkrecht zur Hauptstreckungsebene. Dadurch wird insbesondere ein Herstellungsprozess des mikroelektromechanischen Spiegels vereinfacht. Beispielsweise beträgt eine Dicke des Substrats zwischen 20 μm und 500 μm . Alternativ kann das Substrat auch Bereiche mit unterschiedlichen Dicken aufweisen. Beispielsweise kann das Substrat im Bereich des Rahmens eine größere Dicke aufweisen, um eine mechanische Stabilität des mikroelektromechanischen Spiegels zu verbessern, während das Substrat im Bereich des Antriebsrings zum Beispiel eine geringere Dicke und somit eine höhere Flexibilität und/oder eine geringere Trägheit aufweist. Das Substrat im Bereich des Spiegelements kann im Vergleich zum Antriebsring eine größere Dicke aufweisen, um beispielsweise Verformungen des Spiegelements während des Betriebs zu verringern.

[0042] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels ist auf dem Antriebsring eine piezoelektrische Schicht aufgebracht. Insbesondere ist die piezoelektrische Schicht zumindest stellenweise auf einer Hauptfläche des Antriebsringes aufgebracht, die parallel zur Hauptstreckungsebene des Spiegelements angeordnet ist. Die piezoelektrische Schicht weist beispielsweise PZT, AlN oder BFO-BT auf, oder besteht aus einem dieser Materialien. Beispielsweise weist die piezoelektrische Schicht eine Dicke zwischen 0,5 μm und 5 μm auf.

[0043] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels ist die piezoelektrische Schicht zwischen einer ersten Elektrode und einer zweiten Elektrode angeordnet. Die erste und zweite Elektrode sind insbesondere zum Anlegen einer elektrischen Spannung an die piezoelektrische Schicht eingerichtet. Durch Anlegen der elektrischen Spannung im Betrieb werden im Antriebsring insbesondere mechanische Verspannungen erzeugt. Die mechanischen Verspannungen induzieren beispielsweise Torsionsmomente und/oder Biegemomente, die über die zweiten Torsionsfederelemente auf die Torsionsaufhängung und/oder auf das Spiegelement übertragen werden.

[0044] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels weist die zweite Elektrode eine Mehrzahl von Ansteuerbereichen auf, die voneinander getrennt sind. Beispielsweise ist die zweite Elektrode segmentiert. Insbesondere sind die Ansteuerbereiche unabhängig voneinander elektrisch ansteuerbar. Durch Anlegen von elektrischen Spannungen an verschiedene Ansteuerbereiche können im Antriebsring beispielsweise unterschiedliche Torsions- und/oder Biegemomente erzeugt werden, um insbesondere unterschiedliche Schwingungsmoden der Torsionsaufhängung und/oder des Spiegelements anzuregen.

[0045] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels ist auf dem Antriebsring und/oder auf dem Rahmen zumindest ein Sensorelement zur Bestimmung einer Auslenkung und/oder einer Frequenz einer Schwingung des Spiegelements angeordnet.

[0046] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels ist auf der Torsionsaufhängung zumindest ein Sensorelement zur Bestimmung einer Auslenkung und/oder einer Frequenz einer Schwingung des Spiegelements angeordnet.

[0047] Insbesondere kann durch das zumindest eine Sensorelement im Betrieb eine Ausrichtung des Spiegelements relativ zur Torsionsaufhängung, zum Antriebsring und/oder zum Rahmen bestimmt werden. Das Sensorelement erzeugt beispielsweise ein zeitabhängiges elektrisches Signal, das zum Beispiel proportional zu einem momentanen Auslenkwinkel des Spiegelements ist.

[0048] Beispielsweise kann das elektrische Signal des Sensorelements zu einer Regelung und/oder zu einer Feinjustage von Schwingungsfrequenzen des Spiegelements um die zwei Drehachsen verwendet werden. In anderen Worten kann ein Ansteuersignal des Antriebsringes in Abhängigkeit der ermittelten Messwerte des Sensorelements angepasst werden.

[0049] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels umfasst das zumindest eine Sensorelement eine piezoelektrische Schicht. Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels ist die piezoelektrische Schicht zwischen zwei Elektroden angeordnet. Die piezoelektrische Schicht ist beispielsweise auf einer Fläche der Torsionsaufhängung aufgebracht, die parallel zur Hauptstreckungsebene des Spiegelements angeordnet ist. Eine Auslenkung des Spiegelements erzeugt beispielsweise eine mechanische Verspannung in der Torsionsaufhängung. Dadurch wird die piezoelektrische Schicht insbesondere verformt und erzeugt eine elektrische Spannung. Diese elektrische Spannung kann beispielsweise als elektrisches Signal des Sensorelements ausgelesen werden.

[0050] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des mikroelektromechanischen Spiegels ist die Torsionsaufhängung zu einer Linearisierung einer Schwingungsmoden um die lange Achse eingerichtet. In anderen Worten weist die Schwingungsmoden um die lange Achse aufgrund der Form der Torsionsaufhängung eine geringere Anharmonizität auf. Beispielsweise führt die langgestreckte Form der Torsionsaufhängung zu einer Linearisierung der Schwingungsmoden um die lange Achse. Insbesondere ist die Schwingungsmoden um die lange Achse eine Kombination aus einer Torsionsbewegung des Spiegelements, wobei sich die ersten Torsionsfederelemente winden, und einer Verbiegungsbewegung der Torsionsaufhängung.

[0051] Dem hier beschriebenen mikroelektromechanischen Spiegel liegen insbesondere folgende Ideen zugrunde. Drehschwingungen des Spiegelements um die erste und zweite Drehachse werden beispielsweise resonant angeregt. Dadurch ergibt sich zum Beispiel ein sogenanntes Lissajous Abrastern (Englisch: Lissajous scanning), bei dem ein vom Spiegelement umgelenkter Laserstrahl im Betrieb des mikroelektromechanischen Spiegels eine Lissajous-Figur auf einer Projektionsfläche beschreibt. Durch zeitliche Modulation des Laserstrahls kann beispielsweise ein statisches oder bewegtes Bild auf der Projektionsfläche erzeugt werden. Für eine vorgegebene Bildwiederholfrequenz und eine vorgegebene Bildauflösung stellen sich dadurch insbesondere folgende Anforderungen an den mikroelektromechanischen Spiegel:

- ein Durchmesser des Spiegelements bestimmt eine Apertur und somit eine beugungsbegrenzte Auflösung einzelner Bildpunkte;
- ein maximaler Ablenkwinkel des Spiegelements um die erste und zweite Drehachse bestimmt gemeinsam mit dem Durchmesser des Spiegelements eine Bildauflösung, also eine Anzahl von Bildpunkten je Richtung. Beispielsweise soll der mikroelektromechanische Spiegel eine Bildauflösung von zumindest 1024 x 768 Pixel, bevorzugt von zumindest 720p erreichen;
- Resonanzfrequenzen von Schwingungsmoden, bei denen das Spiegelement um die erste Drehachse beziehungsweise um die zweite Drehachse schwingt, bestimmen insbesondere eine Bildwiederholrate und beeinflussen auch die Bildauflösung;
- die Schwingungsmoden sollten das Spiegelement während des Betriebs so wenig als möglich verbiegen, damit die reflektierende Schicht möglichst eben bleibt, um Abbildungsfehler, eine Pixelverschmierung und/oder Specklemuster zu vermeiden;
- das Spiegelement sollte harmonisch um die erste und zweite Drehachse schwingen, um ein

stabiles Frequenzverhältnis zwischen den Frequenzen der Schwingungen um die beiden Drehachsen zu gewährleisten;

- die Resonanzen der Schwingungsmoden sollten eine nicht zu geringe Bandbreite aufweisen, um eine Feinjustage der Frequenzen der Schwingungen um die erste und zweite Drehachse während des Betriebs zu ermöglichen;
- der mikroelektromechanische Spiegel sollte eine möglichst kompakte Bauform aufweisen;
- der mikroelektromechanische Spiegel sollte möglichst resistent gegenüber Erschütterungen während des Betriebs sein; und/oder
- der mikroelektromechanische Spiegel sollte eine möglichst geringe Leistungsaufnahme aufweisen, zum Beispiel höchstens 200 mW, bevorzugt höchstens 100 mW, und besonders bevorzugt höchstens 50 mW.

[0052] Der hier beschriebene mikroelektromechanische Spiegel erfüllt zumindest eine, bevorzugt mehrere und besonders bevorzugt alle der oben genannten Anforderungen beispielsweise aufgrund zumindest einem, bevorzugt mehreren, und besonders bevorzugt allen der folgenden Merkmale:

- die Schwingung um die kurze Achse ist insbesondere eine reine Torsionsschwingungsmoden, während die Schwingung um die lange Achse aufgrund der langgestreckten Form der Torsionsaufhängung beispielsweise eine modifizierte „Rocking“-Mode ist, die eine Kombination einer Torsionsbewegung des Spiegelements und einer Verbiegungsbewegung der Torsionsaufhängung ist. Dadurch wird insbesondere die Anharmonizität der Rocking-Mode verringert;
- alle Elemente des mikroelektromechanischen Spiegels weisen beispielsweise ein gemeinsames Substrat mit konstanter Dicke auf. In anderen Worten weisen alle Elemente des mikroelektromechanischen Spiegels ein Substrat mit der gleichen Dicke auf. Dadurch vereinfacht sich ein Herstellungsverfahren des mikroelektromechanischen Spiegels. Alternativ kann das Substrat auch mehrere Bereiche mit unterschiedlichen Dicken aufweisen;
- die Resonanzfrequenzen der beiden Schwingungsmoden sind deutlich unterschiedlich und insbesondere außerhalb eines hörbaren Frequenzbereichs. Dadurch kann die Aufhängung des Spiegels für eine Richtung optimiert werden, wodurch beispielsweise auch die Dicke des Substrats reduziert werden kann;
- ein gewünschter Spiegeldurchmesser, die Form der Torsionsaufhängung, die gewünschten Resonanzfrequenzen und die geforderte Ebenheit des Spiegelements bestimmen in Kombination mit dem Material des Substrats die Dicke des Substrats;
- eine Form und Größe der Torsionsaufhängung sowie eine Dimensionierung der ersten Torsionsfederelemente ergibt sich aus einem gewünschten Winkelbereich für die Drehung um die erste Drehachse, einer erlaubten mechanischen Spannung, einer gewünschten Resonanzfrequenz, sowie einer gewünschten Linearität bzw. Harmonizität der Schwingungsmoden um die erste Drehachse;
- die zweiten Torsionsfederelemente sind für die Drehung um die zweite Drehachse sind innerhalb des Antriebsringes angeordnet und um 90° zur langen Achse der Torsionsaufhängung gedreht. Dadurch weist der mikroelektromechanische Spiegel eine besonders kompakte Bauform auf. Eine Dimensionierung der zweiten Torsionsfederelemente ergibt sich aus einem gewünschten Winkelbereich für die Drehung um die zweite Drehachse, einer erlaubten mechanischen Spannung, sowie einer gewünschten Resonanzfrequenz der Schwingungsmoden um die zweite Drehachse;
- Leiterbahnen zur elektrischen Kontaktierung der piezoelektrischen Schicht des Antriebsringes können auf den dritten Torsionsfederelementen angeordnet werden, die sich während des Betriebs nicht oder nur kaum bewegen.

[0053] Gemäß zumindest einer Ausführungsform wird der mikroelektromechanische Spiegel für die Projektion von Informationen auf eine Oberfläche, für head-up Displays, für Matrixausleuchtungen, für LIDAR Anwendungen, für Hologrammprojektoren, für VR-Brillen, oder für AR-Brillen verwendet.

[0054] Des Weiteren wird ein Verfahren zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels angegeben. Das Verfahren ist insbesondere zum Betrieb des hier beschriebenen mikroelektro-

mechanischen Spiegels anwendbar. Alle Merkmale des mikroelektromechanischen Spiegels sind auch für das Verfahren zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels offenbart, und umgekehrt.

[0055] Gemäß zumindest einer Ausführungsform des Verfahrens zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels wird das Spiegelement mittels eines ersten elektrischen Wechselstromsignals mit einer ersten Frequenz, das auf erste Ansteuerbereiche des Antriebsringes wirkt, in eine erste Schwingungsmode versetzt.

[0056] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens wird die Torsionsaufhängung mittels eines zweiten elektrischen Wechselstromsignals mit einer zweiten Frequenz, das auf zweite Ansteuerbereiche des Antriebsringes wirkt, in eine zweite Schwingungsmode versetzt. Insbesondere schwingt in der zweiten Schwingungsmode die Torsionsaufhängung gemeinsam mit dem Spiegelement.

[0057] Die ersten und zweiten Ansteuerbereiche entsprechen insbesondere Ansteuerbereichen der zweiten Elektrode, die zur elektrischen Kontaktierung der piezoelektrischen Schicht des Antriebsringes eingerichtet ist.

[0058] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens umfasst die erste Schwingungsmode eine Drehung des Spiegelements um die lange Achse.

[0059] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens umfasst die zweite Schwingungsmode eine Drehung des Spiegelements um die kurze Achse. Insbesondere dreht sich die Torsionsaufhängung in der zweiten Schwingungsmode gemeinsam mit dem Spiegelement um die kurze Achse.

[0060] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens werden die erste Schwingungsmode und/oder die zweite Schwingungsmode resonant angeregt. Insbesondere werden die erste Schwingungsmode und die zweite Schwingungsmode simultan angeregt und überlagern sich während des Betriebs des mikroelektromechanischen Spiegels. Die erste Frequenz entspricht beispielsweise einer Resonanzfrequenz der ersten Schwingungsmode, oder weicht höchstens um eine Bandbreite einer Resonanz der ersten Schwingungsmode von der Resonanzfrequenz der ersten Schwingungsmode ab. Die zweite Frequenz entspricht beispielsweise einer Resonanzfrequenz der zweiten Schwingungsmode, oder weicht höchstens um eine Bandbreite einer Resonanz der zweiten Schwingungsmode von der Resonanzfrequenz der zweiten Schwingungsmode ab.

[0061] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens weist eine Bewegung des Antriebsringes in der ersten Schwingungsmode und/oder in der zweiten Schwingungsmode eine Amplitude auf, die höchstens ein Fünftel, bevorzugt höchstens ein Zehntel einer Amplitude einer Bewegung des Spiegelements beträgt. In anderen Worten bewegt sich der Antriebsring in der ersten Schwingungsmode und in der zweiten Schwingungsmode kaum. Beispielsweise ist die Bewegung des Antriebsringes im Vergleich zum Spiegelement vernachlässigbar klein. Dadurch wird beispielsweise eine Dämpfung der Schwingungsmoden aufgrund eines Luftwiderstands verringert und/oder eine Anregungseffizienz erhöht. Beispielsweise wird durch eine mechanische Verstärkung eine kleine Verbiegung des Antriebsringes in eine große Auslenkung des Spiegelements umgewandelt. Des Weiteren verwinden sich die dritten Torsionsfederelemente in der ersten Schwingungsmode und in der zweiten Schwingungsmode wenig oder kaum.

[0062] Leiterbahnen, die beispielsweise zur elektrischen Kontaktierung der Elektroden des Antriebsringes über die dritten Torsionsfederelemente geführt werden, werden aufgrund der geringen Bewegung des Antriebsringes kaum oder so gering als möglich mechanisch belastet. Dadurch wird beispielsweise eine Lebensdauer des mikroelektromechanischen Spiegels erhöht. Die Elektroden des Antriebsringes können alternativ oder zusätzlich über Bonddrähte elektrisch kontaktiert werden.

[0063] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens ist eine Resonanzfrequenz der ersten Schwingungsmode um zumindest einen Faktor 1,3 größer, als eine Resonanzfrequenz der zweiten Schwingungsmode. Durch den deutlichen Unterschied der beiden Reso-

nanzfrequenzen kann die Aufhängung des Spiegelements beispielsweise für die Bewegung um die zwei Drehachsen unabhängig voneinander optimiert werden.

[0064] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens beträgt die Resonanzfrequenz der zweiten Schwingungsmode zumindest 16 kHz, bevorzugt zumindest 20 kHz. Insbesondere liegen die Resonanzfrequenzen der ersten und zweiten Schwingungsmode nicht im hörbaren Bereich, wodurch der mikroelektromechanische Spiegel im Betrieb beispielsweise kein störendes Hintergrundgeräusch erzeugt. Des Weiteren erlauben höhere Resonanzfrequenzen beispielsweise eine Steigerung der Bildauflösung für Projektionsanwendungen.

[0065] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens werden die erste Schwingungsmode und/oder die zweite Schwingungsmode in einem harmonischen Bereich betrieben. In anderen Worten weisen die erste Schwingungsmode und die zweite Schwingungsmode eine geringe Anharmonizität auf. Somit ändert sich ein Frequenzverhältnis zwischen der ersten Schwingungsmode und der zweiten Schwingungsmode während des Betriebs nicht oder nur gering. In anderen Worten bleibt das Frequenzverhältnis während des Betriebs vorteilhaft stabil. Beispielsweise ändert sich das Frequenzverhältnis zwischen der ersten Schwingungsmode und der zweiten Schwingungsmode während des Betriebs um höchstens 5%, bevorzugt um höchstens 1%, besonders bevorzugt um höchstens 0,1%.

[0066] Gemäß zumindest einer weiteren Ausführungsform des Verfahrens ist die zweite Schwingungsmode eine Torsionsschwingung der Torsionsaufhängung mit dem Spiegelement um die kurze Achse, während die erste Schwingungsmode eine Kombination aus einer Torsionsschwingung des Spiegelements um die lange Achse und einer Verbiegungsbewegung der Torsionsaufhängung ist. Insbesondere ist die erste Schwingungsmode eine sogenannte „Rocking“-Mode, bei der beispielsweise eines der zwei zweiten Torsionsfederelemente periodisch in einer Richtung senkrecht zur Haupterstreckungsebene des Spiegelements bewegt wird, während das andere der zwei zweiten Torsionsfederelemente beispielsweise gegenphasig dazu bewegt wird. Dadurch wird insbesondere eine Schwingung des Spiegelements um die lange Achse angeregt.

[0067] Des Weiteren wird eine Projektionsvorrichtung angegeben. Die Projektionsvorrichtung umfasst insbesondere den hier beschriebenen mikroelektromechanischen Spiegel. Alle Merkmale des mikroelektromechanischen Spiegels sind auch für die Projektionsvorrichtung offenbart, und umgekehrt.

[0068] Gemäß zumindest einer Ausführungsform umfasst die Projektionsvorrichtung eine Laserlichtquelle und einen hier beschriebenen mikroelektromechanischen Spiegel. Der mikroelektromechanischen Spiegel lenkt im Betrieb beispielsweise von der Laserlichtquelle emittiertes Laserlicht um. Durch die vorher beschriebenen Schwingungsmoden des Spiegelements kann durch das abgelenkte Laserlicht insbesondere ein von einem Betrachter wahrnehmbarer Bildbereich abgerastert werden. Insbesondere ist der mikroelektromechanische Spiegel zu einem Lissajous-Abrastern des Bildbereichs eingerichtet.

[0069] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen des mikroelektromechanischen Spiegels, des Verfahrens zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels, sowie der Projektionsvorrichtung ergeben sich aus den im Folgenden in Verbindung mit den Figuren beschriebenen Ausführungsbeispielen.

[0070] Figur 1 zeigt eine schematische Draufsicht auf einen mikroelektromechanischen Spiegel gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel.

[0071] Figur 2 zeigt eine schematische Draufsicht auf einen mikroelektromechanischen Spiegel gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel.

[0072] Die Figuren 3A bis 3J zeigen schematische Darstellungen von Schwingungsmoden eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel.

- [0073]** Die Figuren 4A und 4B zeigen schematische Darstellungen einer zweiten Schwingungsmoden eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel.
- [0074]** Die Figuren 5A und 5B zeigen schematische Darstellungen einer ersten Schwingungsmoden eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel.
- [0075]** Figur 6 zeigt eine schematische Darstellung einer Auslenkung eines Spiegelements sowie einer mechanischen Verspannung eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel.
- [0076]** Figur 7 zeigt eine schematische Darstellung einer Auslenkung eines Spiegelements eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel.
- [0077]** Die Figuren 8A bis 8J zeigen schematische Darstellungen von Schwingungsmoden eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel.
- [0078]** Die Figuren 9A und 9B zeigen schematische Darstellungen einer zweiten Schwingungsmoden eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel.
- [0079]** Die Figuren 10A und 10B zeigen schematische Darstellungen einer ersten Schwingungsmoden eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel.
- [0080]** Figur 11 zeigt eine schematische Darstellung einer Auslenkung eines Spiegelements sowie einer mechanischen Verspannung eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel.
- [0081]** Figur 12 zeigt eine schematische Darstellung einer Auslenkung eines Spiegelements eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel.
- [0082]** Figur 13 zeigt eine schematische Schnittdarstellung eines mikroelektromechanischen Spiegels gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel.
- [0083]** Figur 14 zeigt eine schematische Darstellung einer Projektionsvorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel.
- [0084]** Gleiche, gleichartige oder gleichwirkende Elemente sind in den Figuren mit denselben Bezugszeichen versehen. Die Figuren und die Größenverhältnisse der in den Figuren dargestellten Elemente untereinander sind nicht als maßstäblich zu betrachten. Vielmehr können einzelne Elemente zur besseren Darstellbarkeit und/oder zum besseren Verständnis übertrieben groß oder klein dargestellt sein.
- [0085]** Der mikroelektromechanische Spiegel 1 gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel in Figur 1 weist ein Spiegelement 2, ein Verbindungselement 6, eine Torsionsaufhängung 3, einen Antriebsring 5, einen Rahmen 7, sowie jeweils zwei erste, zweite und dritte Torsionsfederelemente 41, 42, 43 auf, die aus einem gemeinsamen Silizium Substrat 8 einstückig ausgebildet sind. Insbesondere zeigt Figur 1 eine Draufsicht auf die Hauptstreckungsebene 21 des Spiegelements 2.
- [0086]** Das Spiegelement 2 ist kreisförmig oder ellipsenförmig und weist beispielsweise einen Durchmesser zwischen 1 mm und 2 mm auf. Auf der Hauptfläche 21 des Spiegelements 2 ist eine reflektierende Schicht 22 aufgebracht (nicht gezeigt), die ein Metall, einen dielektrischen Spiegel oder eine nanostrukturierte Oberfläche aufweist und zur Reflexion von elektromagnetischen

scher Strahlung in einem Spektralbereich zwischen infrarotem und ultraviolettem Licht eingerichtet ist.

[0087] Ein Verbindungselement 6 verbindet das Spiegelement 2 mechanisch mit zwei ersten Torsionsfederelementen 41, die auf gegenüberliegenden Seiten des Spiegelements 2 angeordnet sind. Das Verbindungselement 6 umfasst zwei kreisbogenförmige Segmente 62, die jeweils über zwei Aufhängungspunkte 61 an deren Enden mit dem Spiegelement 2 mechanisch verbunden sind. Die zwei ersten Torsionsfederelemente 41 sind jeweils mit einem der Segmente 61 in der Mitte zwischen den zwei Aufhängungspunkten 61 mechanisch verbunden.

[0088] Die zwei ersten Torsionsfederelemente 41 verbinden das Verbindungselement 6 mit der Torsionsaufhängung 3 mechanisch. Die Torsionsaufhängung 3 umschließt das Spiegelement 2 und das Verbindungselement 6 in der Haupterstreckungsebene 21 vollständig, sodass das Spiegelement 2 im Zentrum der Torsionsaufhängung 3 angeordnet ist. Die Torsionsaufhängung 3 hat eine langgestreckte Form mit einer langen Achse 31 und einer kurzen Achse 32, die jeweils Symmetrieachsen der Torsionsaufhängung 3 sind. Der Durchmesser der Torsionsaufhängung 3 entlang der langen Achse 31 ist um ungefähr 50% größer als der Durchmesser der Torsionsaufhängung 3 entlang der kurzen Achse 32. Ein Umfang der Torsionsaufhängung 3 hat die Form eines eingedrückten oder eingeschnürten Ovals. Die zwei ersten Torsionsfederelemente 41 sind entlang der langen Achse 31 angeordnet.

[0089] Die zwei zweiten Torsionsfederelemente 42 verbinden die Torsionsaufhängung 3 mit dem Antriebsring 5 mechanisch. Die zwei zweiten Torsionsfederelemente 42 sind auf gegenüberliegenden Seiten der Torsionsaufhängung 3 entlang der kurzen Achse 32 angeordnet.

[0090] Der Antriebsring 5 ist kreisförmig oder ellipsenförmig und über zwei dritte Torsionsfederelemente 43 mit dem Rahmen 7 mechanisch verbunden. Die Torsionsaufhängung 3 ist im Zentrum des Antriebsringes 5 angeordnet. Der Rahmen 7 umschließt den Antriebsring 5 in der Haupterstreckungsebene 21 vollständig. Auf einer Hauptfläche des Antriebsringes 5, die parallel zur Haupterstreckungsebene 21 angeordnet ist, ist eine piezoelektrische Schicht 50 aus PZT (nicht gezeigt) aufgebracht, die zwischen einer ersten Elektrode 51 (nicht gezeigt) und einer zweiten Elektrode 52 angeordnet ist. Die zweite Elektrode 52 weist voneinander getrennte erste Ansteuerbereiche 521a, 521b und zweite Ansteuerbereiche 522a, 522b auf.

[0091] Durch Anlegen einer zeitlich oszillierenden elektrischen Spannung zwischen der ersten Elektrode 51 und den ersten Ansteuerbereichen 521a, 521b der zweiten Elektrode 52 kann eine erste Schwingungsmoden 11 des mikroelektromechanischen Spiegels 1 angeregt werden. Durch Anlegen einer zeitlich oszillierenden elektrischen Spannung zwischen der ersten Elektrode 51 und den zweiten Ansteuerbereichen 522a, 522b der zweiten Elektrode 52 kann eine zweite Schwingungsmoden 12 des mikroelektromechanischen Spiegels 1 angeregt werden. Dabei umfasst die erste Schwingungsmoden 11 insbesondere eine Drehschwingung des Spiegelements 2 um die lange Achse 31, während die zweite Schwingungsmoden 12 insbesondere eine Drehschwingung des Spiegelements 2 um die kurze Achse 32 umfasst. Die elektrische Spannung wird in den ersten Ansteuerbereichen 521a und 521b insbesondere mit entgegengesetzter Phase angelegt. Ebenso wird die elektrische Spannung in den zweiten Ansteuerbereichen 522a und 522b insbesondere mit entgegengesetzter Phase angelegt.

[0092] Sowohl auf dem Antriebsring 5, als auch auf dem Rahmen 7 sind Sensorelemente 9 zur Bestimmung einer Auslenkung und/oder einer Frequenz der Schwingung des Spiegelements 2 während des Betriebs des mikroelektromechanischen Spiegels 1 angeordnet. Die Sensorelemente 9 umfassen eine piezoelektrische Schicht 90 (nicht gezeigt), die zwischen einer ersten Elektrode 91 (nicht gezeigt) und einer zweiten Elektrode 92 angeordnet ist. Die Sensorelemente 9 erfassen insbesondere mechanische Verspannungen des mikroelektromechanischen Spiegels 2, die während einer Schwingung des Spiegelements 2 im Betrieb des mikroelektromechanischen Spiegels 1 auftreten.

[0093] Der mikroelektromechanische Spiegel 1 des ersten Ausführungsbeispiels weist insbesondere folgende Merkmale auf:

- Dicke der piezoelektrischen Schicht 50, 90: 1,7 μm ;
- Dicke des Si Substrats 8: 150 μm , wobei die kurze Achse 32 entlang einer Kristallrichtung $\langle 100 \rangle$ ausgerichtet ist und die lange Achse 31 entlang einer Kristallrichtung $\langle 010 \rangle$ ausgerichtet ist;
- Abmessungen des mikroelektromechanischen Spiegels 1 in der Hauptstreckungsebene 21: 7,65 mm x 9,35 mm;
- Resonanzfrequenz der ersten Schwingungsmoden 11: 30,8 kHz;
- Resonanzfrequenz der zweiten Schwingungsmoden 12: 20,9 kHz;
- maximaler Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 in der ersten Schwingungsmoden 11: 16,5°;
- maximaler Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 in der zweiten Schwingungsmoden 12: 11°;
- Q-Faktor der Schwingungsmoden: 10^3 ;
- Anharmonizität der ersten Schwingungsmoden 11: Frequenzverschiebung von 6 Hz bei einem Auslenkungswinkel von 1° bis 16,5°;
- Anharmonizität der zweiten Schwingungsmoden 12: Frequenzverschiebung von -1,4 Hz bei einem Auslenkungswinkel von 1° bis 11°;
- Sensitivität des Sensorelements 9 für die erste Schwingungsmoden 11: 0,5 $\mu\text{A}/^\circ$ bis 15,0 $\mu\text{A}/^\circ$;
- Sensitivität des Sensorelements 9 für die zweite Schwingungsmoden 12: 0,2 $\mu\text{A}/^\circ$ bis 1,5 $\mu\text{A}/^\circ$.

[0094] Der mikroelektromechanische Spiegel 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel in Figur 2 umfasst im Gegensatz zum ersten Ausführungsbeispiel eine Torsionsaufhängung 3 mit einer elliptischen Ringform. Des Weiteren sind auf einer Hauptfläche der Torsionsaufhängung 3, die parallel zur Hauptstreckungsebene 21 angeordnet ist, weitere Sensorelemente 9 angeordnet. Die Sensorelemente 9 umfassen eine piezoelektrische Schicht 90 (nicht gezeigt), die zwischen einer ersten Elektrode 91 (nicht gezeigt) und einer zweiten Elektrode 92 angeordnet ist. Die zweite Elektrode 92 ist segmentiert, so dass das Sensorelement 9 auf der Torsionsaufhängung 3 mehrere Auslesebereiche aufweist. Durch die weiteren Sensorelemente 9 auf der Torsionsaufhängung 3 kann beispielsweise eine Messgenauigkeit der Sensorelemente verbessert werden.

[0095] Darüber hinaus ist das Verbindungselement 6 im zweiten Ausführungsbeispiel kreisringförmig ausgebildet und weist zwei Aufhängungspunkte 61 für das Spiegelement 2 entlang der kurzen Achse 32 auf.

[0096] Der mikroelektromechanische Spiegel 1 des zweiten Ausführungsbeispiels weist insbesondere folgende Merkmale auf:

- Dicke der piezoelektrischen Schicht 50, 90: 1,7 μm ;
- Dicke des Si Substrats 8: 50 μm , wobei die kurze Achse 32 entlang einer Kristallrichtung $\langle 100 \rangle$ ausgerichtet ist und die lange Achse 31 entlang einer Kristallrichtung $\langle 010 \rangle$ ausgerichtet ist;
- Abmessungen des mikroelektromechanischen Spiegels 1 in der Hauptstreckungsebene 21: 7,65 mm x 9,35 mm;
- Resonanzfrequenz der ersten Schwingungsmoden 11: 20,3 kHz;
- Resonanzfrequenz der zweiten Schwingungsmoden 12: 9,2 kHz;
- maximaler Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 in der ersten Schwingungsmoden 11: 16,5°;
- maximaler Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 in der zweiten Schwingungsmoden 12: 11°;
- Q-Faktor der Schwingungsmoden: 10^3 ;
- Anharmonizität der ersten Schwingungsmoden 11: Frequenzverschiebung von 184,6 Hz bei einem Auslenkungswinkel von 1° bis 16,5°;
- Anharmonizität der zweiten Schwingungsmoden 12: Frequenzverschiebung von 21,2 Hz bei einem Auslenkungswinkel von 1° bis 11°;
- Sensitivität des Sensorelements 9 für die erste Schwingungsmoden 11: 0,5 $\mu\text{A}/^\circ$ bis 45,2 $\mu\text{A}/^\circ$;
- Sensitivität des Sensorelements 9 für die zweite Schwingungsmoden 12: 0,04 $\mu\text{A}/^\circ$ bis 19,2 $\mu\text{A}/^\circ$.

[0097] Die Figuren 3A bis 3J zeigen numerische Simulationen verschiedener Schwingungsmoden eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist eine Auslenkung unterschiedlicher Elemente des mikroelektromechanischen Spie-

gels 1 zu einem bestimmten Zeitpunkt zur besseren Darstellbarkeit übertrieben groß dargestellt. Die Resonanzfrequenzen f_R der dargestellten Schwingungsmoden sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Fig.	3A	3B	3C	3D	3E
f_R [kHz]	8, 66	10, 74	17,22	20, 86	27,47

Fig.	3F	3G	3H	3I	3J
f_R [kHz]	30, 81	37,45	40, 73	47,32	49, 10

[0098] Die Schwingungsmoden in Figur 3D entspricht der zweiten Schwingungsmoden 12 des ersten Ausführungsbeispiels, bei dem das Spiegelement 2 gemeinsam mit der Torsionsaufhängung 3 eine Drehschwingung um die kurze Achse 32 ausführt.

[0099] Die Schwingungsmoden in Figur 3F entspricht der ersten Schwingungsmoden 11 des ersten Ausführungsbeispiels, bei dem das Spiegelement 2 eine Drehschwingung um die lange Achse 31 ausführt, während die Torsionsaufhängung 3 insbesondere eine Biegebewegung ausführt.

[00100] Die Resonanzfrequenzen der verschiedenen Schwingungsmoden weisen insbesondere einen großen Frequenzabstand auf, so dass die erste und zweite Schwingungsmoden 11 und 12 gezielt angeregt werden können, ohne dabei weitere parasitäre Schwingungsmoden anzuregen.

[00101] Die Figur 4A zeigt eine schematische Darstellung einer Zugspannung in einem Material eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Zugspannung innerhalb des mikroelektromechanischen Spiegels 1 bei einem maximalen Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 von 11° um die kurze Achse 32 in der zweiten Schwingungsmoden 12 dargestellt. Eine maximale Zugspannung beträgt dabei etwa 1,7 GPa.

[00102] Die Figur 4B zeigt eine schematische Darstellung einer Deformation der Haupterstreckungsebene 21 des Spiegelements 2 eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Deformation in einer Richtung senkrecht zur Haupterstreckungsebene 21 bei einem maximalen Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 von 11° um die kurze Achse 32 in der zweiten Schwingungsmoden 12 dargestellt. Eine maximale Deformation beträgt dabei etwa ± 250 nm am Rand des Spiegelements 2.

[00103] Die Figur 5A zeigt eine schematische Darstellung einer Zugspannung in einem Material eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Zugspannung bei einem maximalen Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 von $16,5^\circ$ um die lange Achse 31 in der ersten Schwingungsmoden 11 dargestellt. Eine maximale Zugspannung beträgt dabei etwa 2,4 GPa.

[00104] Die Figur 5B zeigt eine schematische Darstellung einer Deformation der Haupterstreckungsebene 21 des Spiegelements 2 eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Deformation in einer Richtung senkrecht zur Haupterstreckungsebene 21 bei einem maximalen Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 von $16,5^\circ$ um die lange Achse 31 in der ersten Schwingungsmoden 11 dargestellt. Eine maximale Deformation beträgt dabei etwa ± 310 nm am Rand des Spiegelements 2.

[00105] Figur 6 zeigt Auslenkungswinkel ϕ_1 , ϕ_2 eines Spiegelements 2 um die lange Achse 31 beziehungsweise um die kurze Achse 32, sowie eine maximale Zugspannung Z im Material eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel während einer Schwingung des Spiegelements 2 entsprechend der ersten und zweiten Schwingungsmoden 11, 12 als Funktion der Zeit t .

[00106] Figur 7 zeigt Auslenkungswinkel ϕ_1 , ϕ_2 eines Spiegelements 2 um die lange Achse

31 und um die kurze Achse 32 eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel, bei dem gleichzeitig die erste Schwingungsmoden 11 und die zweite Schwingungsmoden 12 getrieben wird. Insbesondere beschreibt die Auslenkung des Spiegels als Funktion der Zeit eine Lissajous Figur.

[00107] Die Figuren 8A bis 8J zeigen numerische Simulationen verschiedener Schwingungsmoden eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Auslenkung unterschiedlicher Elemente des mikroelektromechanischen Spiegels 1 zu einem bestimmten Zeitpunkt zur besseren Darstellbarkeit übertrieben groß dargestellt. Die Resonanzfrequenzen f_R der dargestellten Schwingungsmoden sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Fig.	8A	8B	8C	8D	8E
f_R [kHz]	3, 08	3, 85	7, 67	9, 20	12, 99

Fig.	8F	8G	8H	8I	8J
f_R [kHz]	14,27	18,76	20,29	23, 31	29, 37

[00108] Die Schwingungsmoden in Figur 8D entspricht der zweiten Schwingungsmoden 12 des zweiten Ausführungsbeispiels, bei dem das Spiegelement 2 gemeinsam mit der Torsionsaufhängung 3 eine Drehschwingung um die kurze Achse 32 ausführt.

[00109] Die Schwingungsmoden in Figur 8H entspricht der ersten Schwingungsmoden 11 des zweiten Ausführungsbeispiels, bei dem das Spiegelement 2 eine Drehschwingung um die lange Achse 31 ausführt, während die Torsionsaufhängung 3 insbesondere eine Biegebewegung ausführt.

[00110] Die Figur 9A zeigt eine schematische Darstellung einer Zugspannung in einem Material eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Zugspannung bei einem maximalen Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 von 11° um die kurze Achse 32 in der zweiten Schwingungsmoden 12 dargestellt. Eine maximale Zugspannung beträgt dabei etwa 1,0 GPa.

[00111] Die Figur 9B zeigt eine schematische Darstellung einer Deformation der Haupterstreckungsebene 21 des Spiegelements 2 eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Deformation in einer Richtung senkrecht zur Haupterstreckungsebene 21 bei einem maximalen Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 von 11° um die kurze Achse 32 in der zweiten Schwingungsmoden 12 dargestellt. Eine maximale Deformation beträgt dabei etwa ± 230 nm am Rand des Spiegelements 2.

[00112] Die Figur 10A zeigt eine schematische Darstellung einer Zugspannung in einem Material eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Zugspannung bei einem maximalen Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 von $16,5^\circ$ um die lange Achse 31 in der ersten Schwingungsmoden 11 dargestellt. Eine maximale Zugspannung beträgt dabei etwa 1,5 GPa.

[00113] Die Figur 10B zeigt eine schematische Darstellung einer Deformation der Haupterstreckungsebene 21 des Spiegelements 2 eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist die Deformation in einer Richtung senkrecht zur Haupterstreckungsebene 21 bei einem maximalen Auslenkungswinkel des Spiegelements 2 von $16,5^\circ$ um die lange Achse 31 in der ersten Schwingungsmoden 11 dargestellt. Eine maximale Deformation beträgt dabei etwa ± 430 nm am Rand des Spiegelements 2.

[00114] Figur 11 zeigt Auslenkungswinkel ϕ_1 , ϕ_2 eines Spiegelements 2 um die lange Achse 31 beziehungsweise um die kurze Achse 32, sowie eine maximale Zugspannung Z im Material eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel während

einer Schwingung des Spiegelements 2 entsprechend der ersten und zweiten Schwingungs-
mode 11, 12 als Funktion der Zeit t .

[00115] Figur 12 zeigt Auslenkungswinkel φ_1 , φ_2 eines Spiegelements 2 um die lange Achse 31 und um die kurze Achse 32 eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel, bei dem gleichzeitig die erste Schwingungsmode 11 und die zweite Schwingungsmode 12 getrieben wird. Insbesondere beschreibt die Auslenkung des Spiegels als Funktion der Zeit eine Lissajous Figur.

[00116] Figur 13 zeigt eine schematische Querschnittsansicht eines mikroelektromechanischen Spiegels 1 gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel. Insbesondere ist ein Querschnitt parallel und versetzt zur kurzen Achse 32 gezeigt. Das Spiegelement 2, das Verbindungselement 6, die Torsionsaufhängung 3, der Antriebsring 5 und der Rahmen 7 weisen ein gemeinsames Substrat 8 auf und sind einstückig ausgebildet. Das Substrat 8 weist eine konstante Dicke auf. Auf der Hauptfläche 21 des Spiegelements 2 ist eine metallische reflektierende Schicht 22 angeordnet.

[00117] Auf dem Antriebsring 5 ist die piezoelektrische Schicht 50 zwischen einer ersten Elektrode 51 und einer zweiten Elektrode 52 angeordnet. Auf der Torsionsaufhängung 3 ist ein Sensorelement 9 angeordnet, das eine piezoelektrische Schicht 90 zwischen einer ersten Elektrode 91 und einer zweiten Elektrode 92 umfasst.

[00118] In Figur 14 ist eine schematische Darstellung einer Projektionsvorrichtung 1000 gemäß einem Ausführungsbeispiel gezeigt, die einen mikroelektromechanischen Spiegel 1 gemäß der vorherigen Beschreibung aufweist. Weiterhin weist die Projektionsvorrichtung eine Laserlichtquelle 200 auf, die im Betrieb Laserlicht 201 abstrahlt.

[00119] 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 201, 201' zeitlich in der Amplitude zu modulieren.

[00120] Der mikroelektromechanische Spiegel 1 kann über eine Spiegel-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 2 des mikroelektromechanischen Spiegels 1 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 Bild- beziehungsweise Filminformationen in Steuersignale für die Laserlichtquelle 200 und den mikroelektromechanischen Spiegel 1 einschließlich der zeitlichen Synchronisierung zwischen der Position des Spiegelements 2 und den Amplituden des Laserlichtes 201, 201' entsprechen.

[00121] 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.

BEZUGSZEICHEN

1	mikroelektromechanischer Spiegel
11	erste Schwingungsmode
12	zweite Schwingungsmode
2	Spiegelement
21	Haupterstreckungsebene
22	reflektierende Schicht
3	Torsionsaufhängung
31	lange Achse
32	kurze Achse
41	erste Torsionsfederelemente
42	zweite Torsionsfederelemente
43	dritte Torsionsfederelemente
5	Antriebsring
50	piezoelektrische Schicht
51	erste Elektrode
52	zweite Elektrode
521a, 521b	erster Ansteuerbereich
522a, 522b	zweiter Ansteuerbereich
6	Verbindungselement
61	Aufhängungspunkte
62	Segment
7	Rahmen
8	Substrat
9	Sensorelement
90	piezoelektrische Schicht
91	erste Elektrode
92	zweite Elektrode
200	Laserlichtquelle
201, 201'	Laserlicht
202	Strahlkombinierer
203	Spiegel-Steuerelektronik
204	Sensorelektronik
205	Bildprozessierungselektronik
206	Lasersteuerelektronik
1000	Projektionsvorrichtung
t	Zeit
Z	Zugspannung
φ_1	Auslenkungswinkel um die lange Achse
φ_2	Auslenkungswinkel um die kurze Achse

Ansprüche

1. Mikroelektromechanischer Spiegel (1), aufweisend:
 - ein Spiegelement (2),
 - eine Torsionsaufhängung (3), die das Spiegelement (2) umschließt und über zwei erste Torsionsfederelemente (41) mit dem Spiegelement (2) verbunden ist.
2. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach dem vorhergehenden Anspruch, zusätzlich aufweisend einen piezoelektrischen Antriebsring (5), der die Torsionsaufhängung (3) umgibt und über zwei zweite Torsionsfederelemente (42) mit der Torsionsaufhängung (3) verbunden ist.
3. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Torsionsaufhängung (3) eine langgestreckte Form mit einer langen Achse (31) und einer dazu senkrechten kurzen Achse (32) aufweist.
4. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die ersten Torsionsfederelemente (41) entlang der langen Achse (31) angeordnet sind.
5. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 3 oder 4, wobei die zweiten Torsionsfederelemente (42) entlang der kurzen Achse (32) angeordnet sind.
6. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zwei ersten Torsionsfederelemente (41) auf gegenüberliegenden Seiten des Spiegelements (2) angeordnet sind.
7. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 2 bis 6, wobei die zwei zweiten Torsionsfederelemente (42) auf gegenüberliegenden Seiten der Torsionsaufhängung (3) angeordnet sind.
8. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Torsionsaufhängung (3) eine elliptische Ringform oder die Form eines eingedrückten Ovalrings aufweist.
9. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Torsionsaufhängung (3) keine piezoelektrischen Antriebselemente aufweist und/oder aus einem Substrat besteht.
10. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Spiegelement (2) und die ersten Torsionsfederelemente (41) über ein Verbindungselement (6) miteinander verbunden sind.
11. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach Anspruch 10, wobei das Verbindungselement (6) kreisringförmig ausgebildet und über zwei Aufhängungspunkte (61) mit dem Spiegelement (2) verbunden ist.
12. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach Anspruch 11, wobei die zwei Aufhängungspunkte (61) auf gegenüberliegenden Seiten des Spiegelements (2) entlang der kurzen Achse (32) angeordnet sind.
13. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach Anspruch 10, wobei das Verbindungselement (6) zwei voneinander getrennte kreisbogenförmige Segmente (62) aufweist, die jeweils mit einem der zwei ersten Torsionsfederelemente (41) verbunden sind.
14. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach Anspruch 13, wobei jedes der kreisbogenförmigen Segmente (62) über zwei Aufhängungspunkte (61) mit dem Spiegelement (2) verbunden ist.
15. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 2 bis 14, wobei der Antriebsring (5) kreisringförmig ausgebildet ist.
16. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 2 bis 15, wobei der Antriebsring (5) in einer Haupterstreckungsebene (21) des Spiegelements (2) in Ruhelage angeordnet ist.

17. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 2 bis 16, wobei der Antriebsring (5) über zwei dritte Torsionsfederelemente (43) mit einem Rahmen (7) verbunden ist.
18. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach dem vorherigen Anspruch, wobei die zwei dritten Torsionsfederelemente (43) auf gegenüberliegenden Seiten des Antriebsringes (5) entlang der kurzen Achse (32) angeordnet sind.
19. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 17 oder 18, wobei das Spiegelement (2), die Torsionsaufhängung (3), der Antriebsring (5), der Rahmen (7) und die Torsionsfederelemente (41, 42, 43) als einstückiges Bauteil ausgebildet sind.
20. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei alle Elemente (2, 3, 41, 42, 43, 5, 7) des einstückigen Bauteils ein gemeinsames Substrat (8) aufweisen, das eine konstante Dicke hat.
21. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 2 bis 20, wobei auf dem Antriebsring (5) eine piezoelektrische Schicht (50) aufgebracht ist.
22. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die piezoelektrische Schicht (50) zwischen einer ersten Elektrode (51) und einer zweiten Elektrode (52) angeordnet ist.
23. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die zweite Elektrode (52) eine Mehrzahl von Ansteuerbereichen (521a, 521b, 522a, 522b) aufweist, die voneinander getrennt sind.
24. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 17 bis 23, wobei auf dem Antriebsring (5) und/oder auf dem Rahmen (7) zumindest ein Sensorelement (9) zur Bestimmung einer Auslenkung und/oder einer Frequenz einer Schwingung des Spiegelements (2) angeordnet ist.
25. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei auf der Torsionsaufhängung (3) zumindest ein Sensorelement (9) zur Bestimmung einer Auslenkung und/oder einer Frequenz einer Schwingung des Spiegelements (2) angeordnet ist.
26. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 24 oder 25, wobei das zumindest eine Sensorelement (9) eine piezoelektrische Schicht (90) umfasst.
27. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die piezoelektrische Schicht (90) zwischen zwei Elektroden (91, 92) angeordnet ist.
28. Mikroelektromechanischer Spiegel (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Torsionsaufhängung (3) zu einer Linearisierung einer Schwingungsmode um die lange Achse (31) eingerichtet ist.
29. Verfahren zum Betrieb eines mikroelektromechanischen Spiegels (1) nach einem der Ansprüche 2 bis 28, bei dem das Spiegelement (2) mittels eines ersten elektrischen Wechselstromsignals mit einer ersten Frequenz, das auf erste Ansteuerbereiche (521a, 521b) des Antriebsringes (5) wirkt, in eine erste Schwingungsmode (11) versetzt wird.
30. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, bei dem die Torsionsaufhängung (3) mittels eines zweiten elektrischen Wechselstromsignals mit einer zweiten Frequenz, das auf zweite Ansteuerbereiche (522a, 522b) des Antriebsringes (5) wirkt, in eine zweite Schwingungsmode (12) versetzt wird.
31. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, bei dem
 - die erste Schwingungsmode (11) eine Drehung des Spiegelements (2) um die lange Achse (31) umfasst, und
 - die zweite Schwingungsmode (12) eine Drehung des Spiegelements (2) um die kurze Achse (32) umfasst.

32. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, bei dem die erste Schwingungsmode (11) und/oder die zweite Schwingungsmode (12) resonant angeregt werden.
33. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 32, bei dem eine Bewegung des Antriebsrings (5) in der ersten Schwingungsmode (11) und/oder in der zweiten Schwingungsmode (12) eine Amplitude aufweist, die höchstens ein Fünftel einer Amplitude einer Bewegung des Spiegelements (2) beträgt.
34. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 33, bei dem eine Resonanzfrequenz der ersten Schwingungsmode (11) um zumindest einen Faktor 1,3 größer ist, als eine Resonanzfrequenz der zweiten Schwingungsmode (12).
35. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 34, bei dem die erste Schwingungsmode (11) und/oder die zweite Schwingungsmode (12) in einem harmonischen Bereich betrieben werden.
36. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 35, bei dem die zweite Schwingungsmode (12) eine Torsionsschwingung der Torsionsaufhängung (3) mit dem Spiegelement (2) um die kurze Achse ist, während die erste Schwingungsmode (11) eine Kombination aus einer Torsionsschwingung des Spiegelements (2) um die lange Achse und einer Verbiegungsbewegung der Torsionsaufhängung (3) ist.
37. Projektionsvorrichtung (1000), aufweisend eine Laserlichtquelle (200) und einen mikroelektromechanischen Spiegel (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 28.
38. Verwendung eines mikroelektromechanischen Spiegels (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 28 für die Projektion von Informationen auf eine Oberfläche, für head-up Displays, für Matrixausleuchtungen, für LIDAR Anwendungen, für Hologrammprojektoren, für VR-Brillen, oder für AR-Brillen.

Hierzu 10 Blatt Zeichnungen

1/10

FIG 1

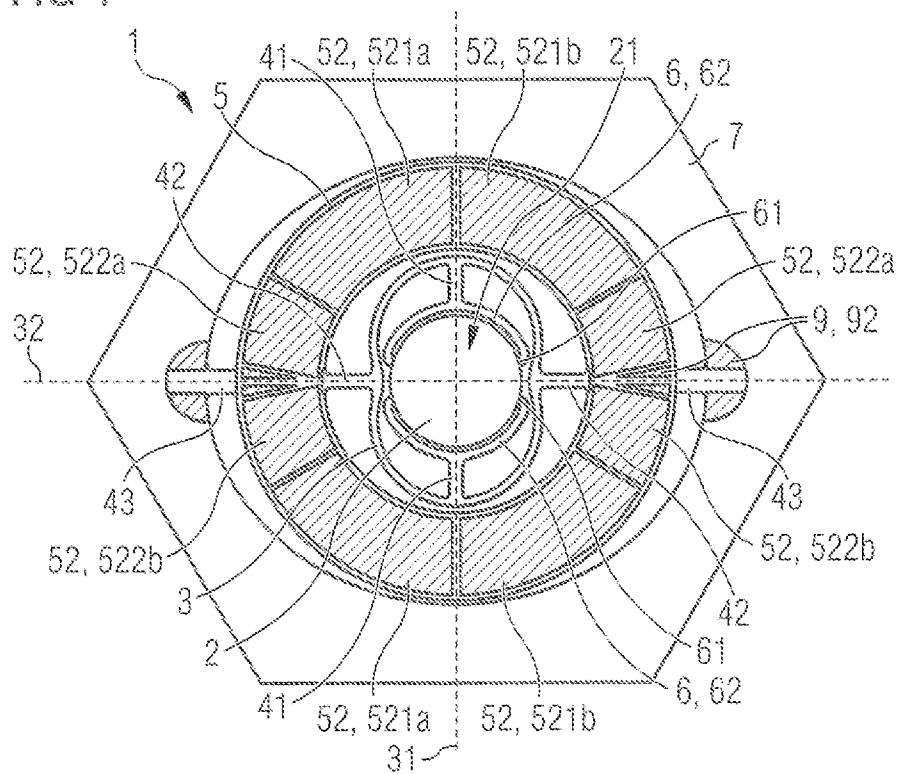
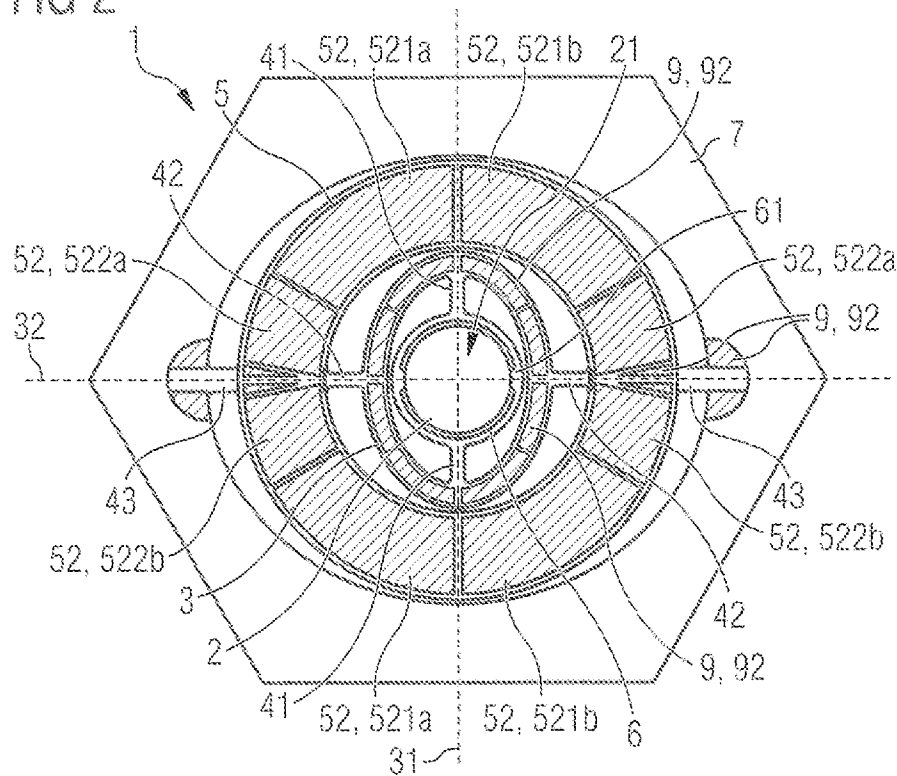


FIG 2



2/10

FIG 3A

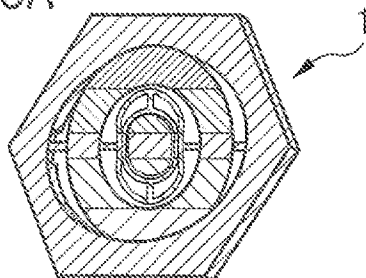


FIG 3B

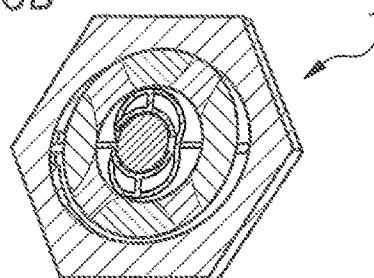


FIG 3C

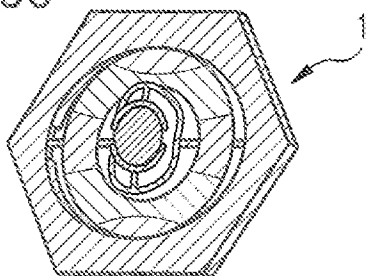


FIG 3D

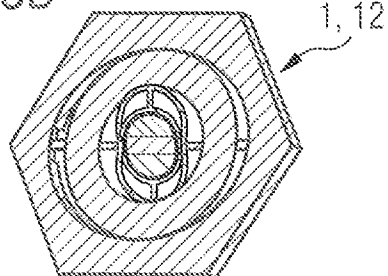


FIG 3E

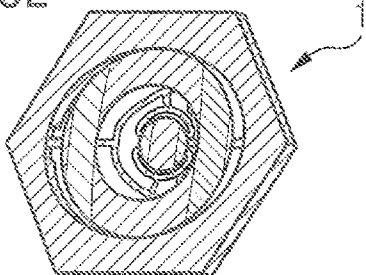


FIG 3F

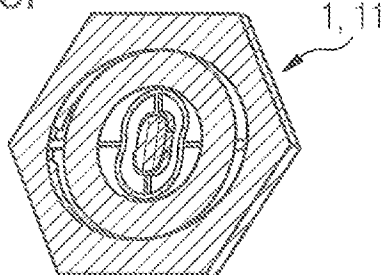


FIG 3G

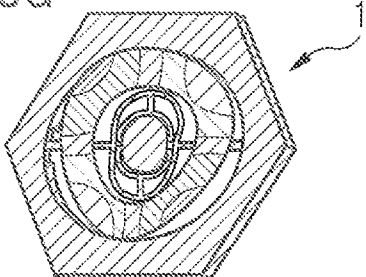


FIG 3H

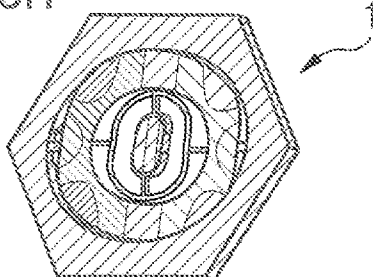


FIG 3I

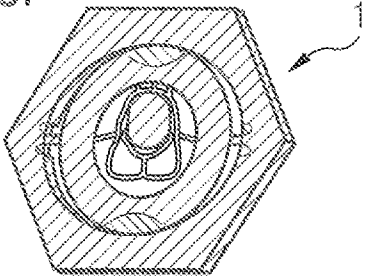
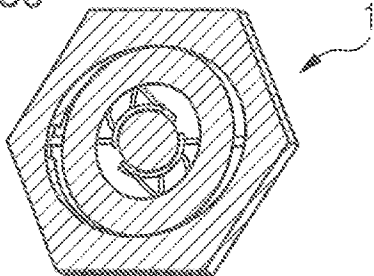
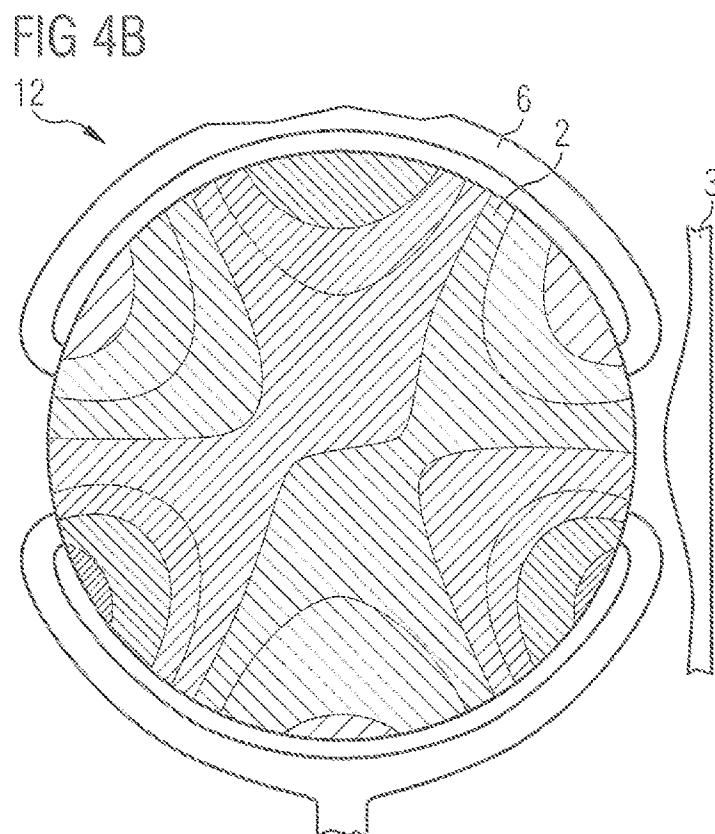
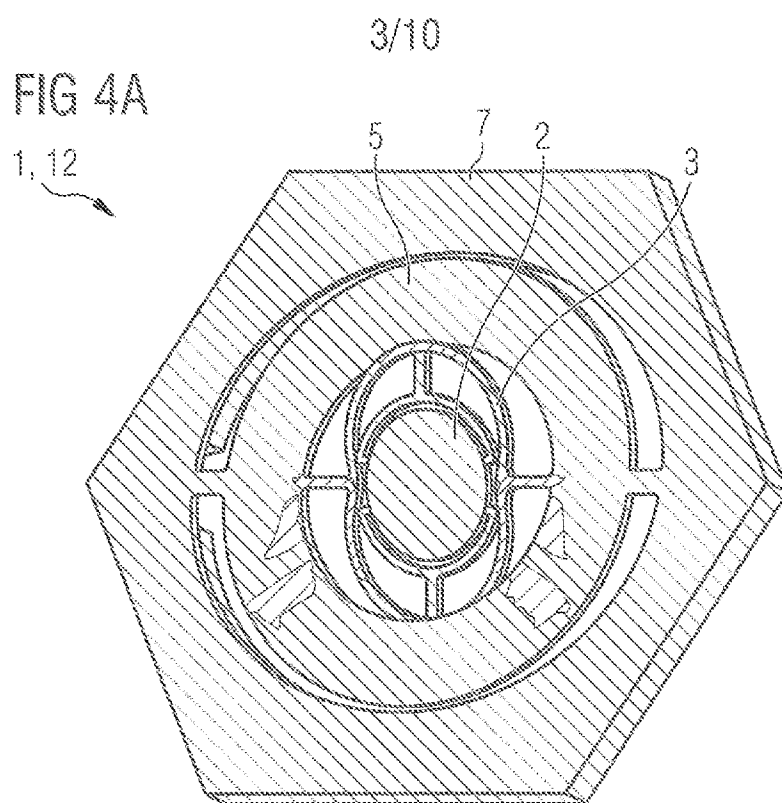


FIG 3J





4/10

FIG 5A

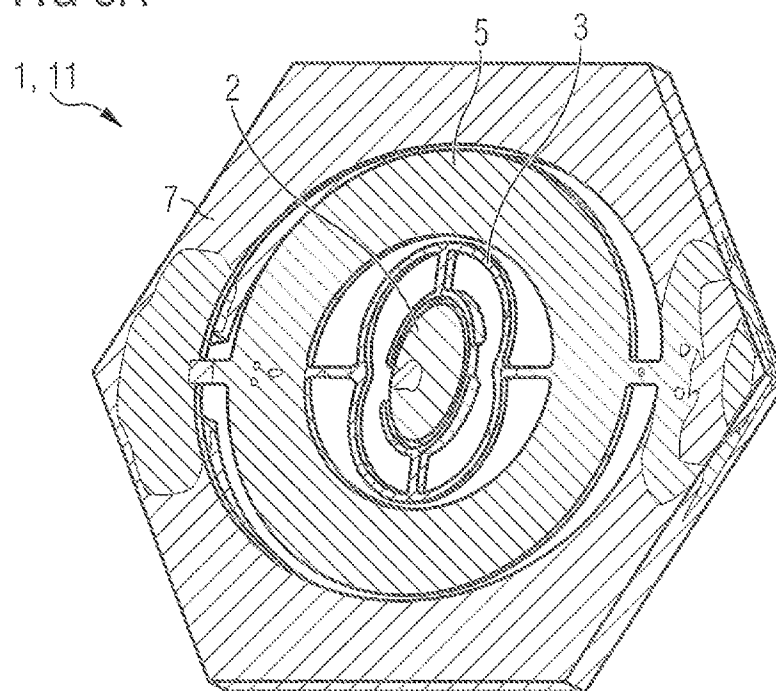
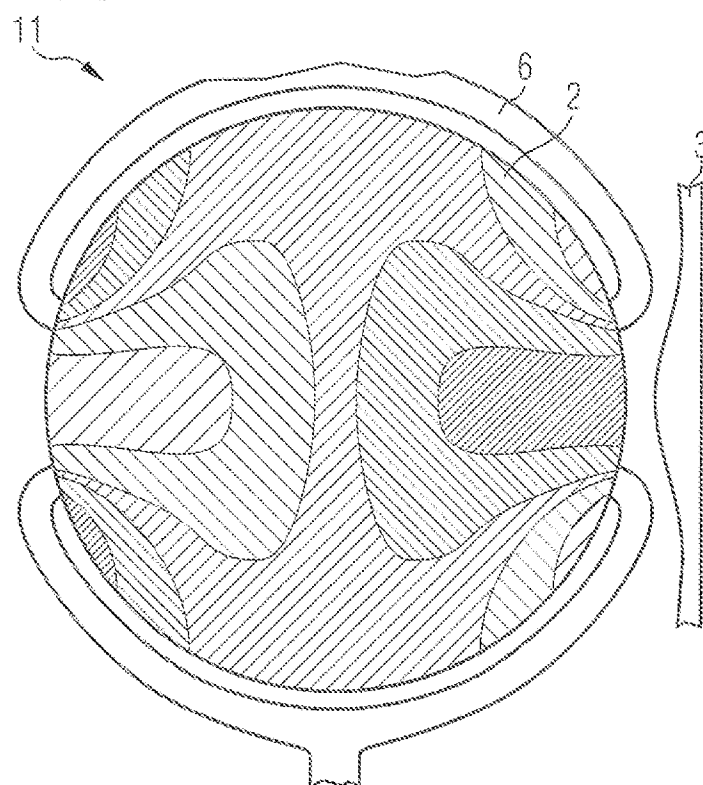


FIG 5B



5/10

FIG 6

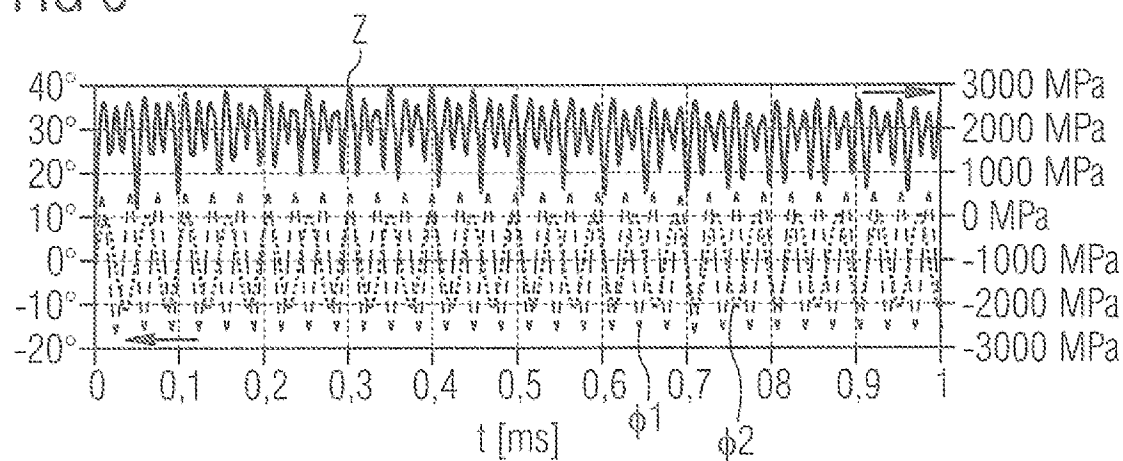
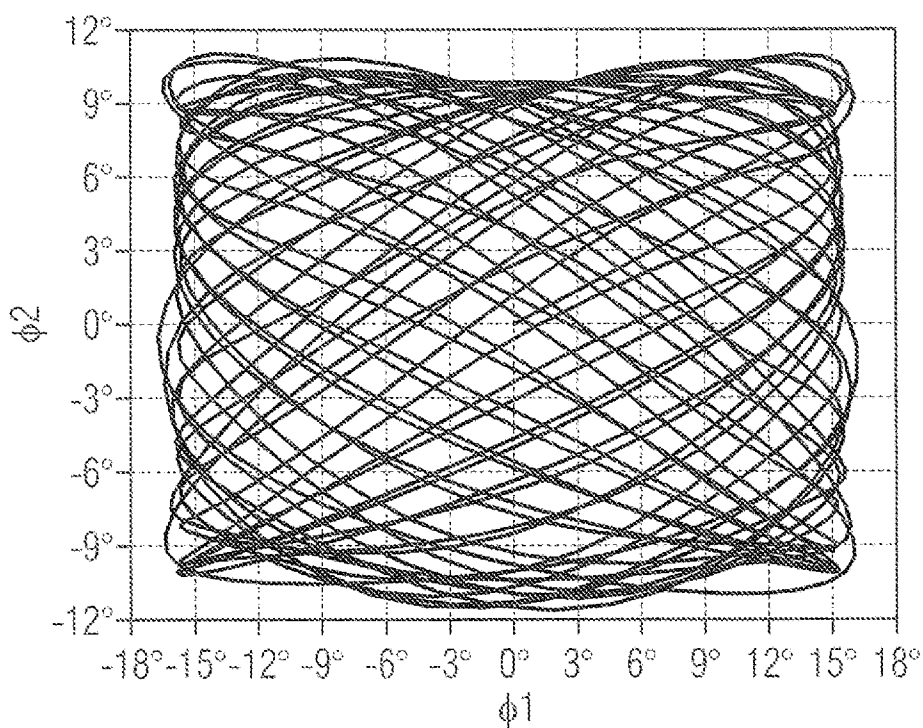


FIG 7



6/10

FIG 8A

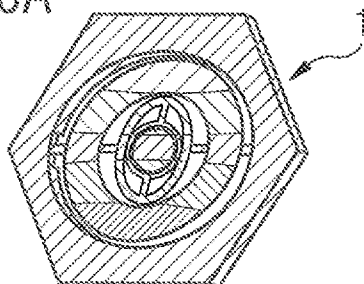


FIG 8B

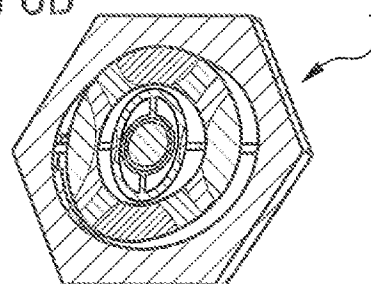


FIG 8C

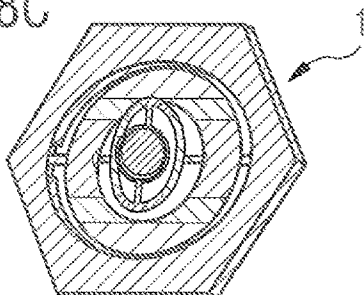


FIG 8D

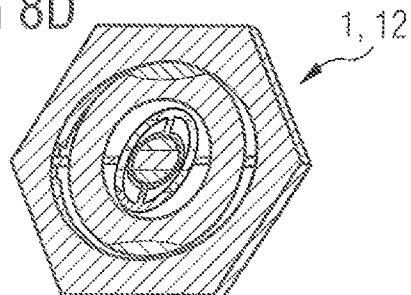


FIG 8E

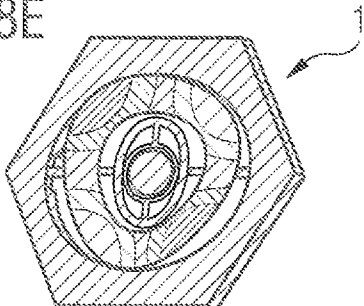


FIG 8F

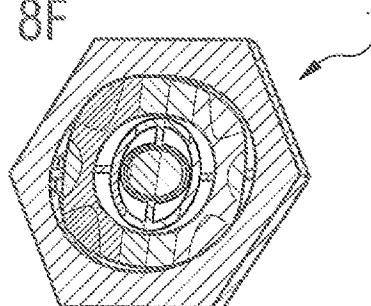


FIG 8G

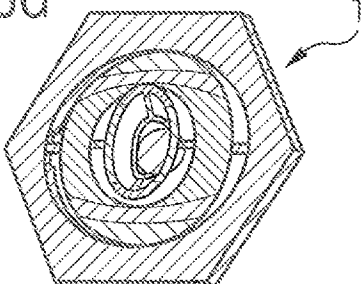


FIG 8H

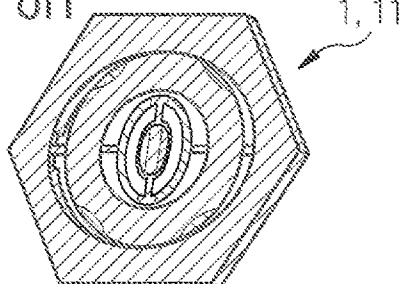


FIG 8I

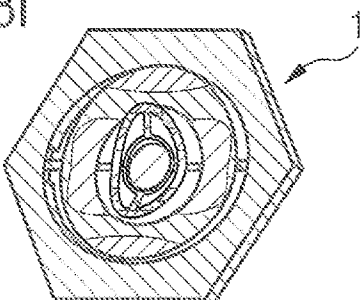
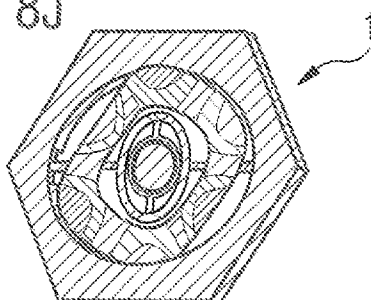


FIG 8J



7/10

FIG 9A

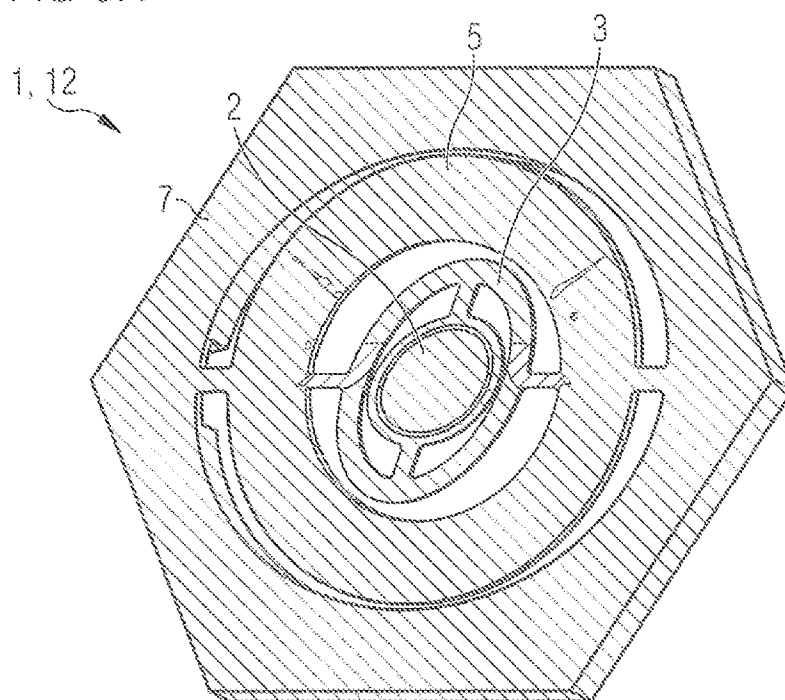
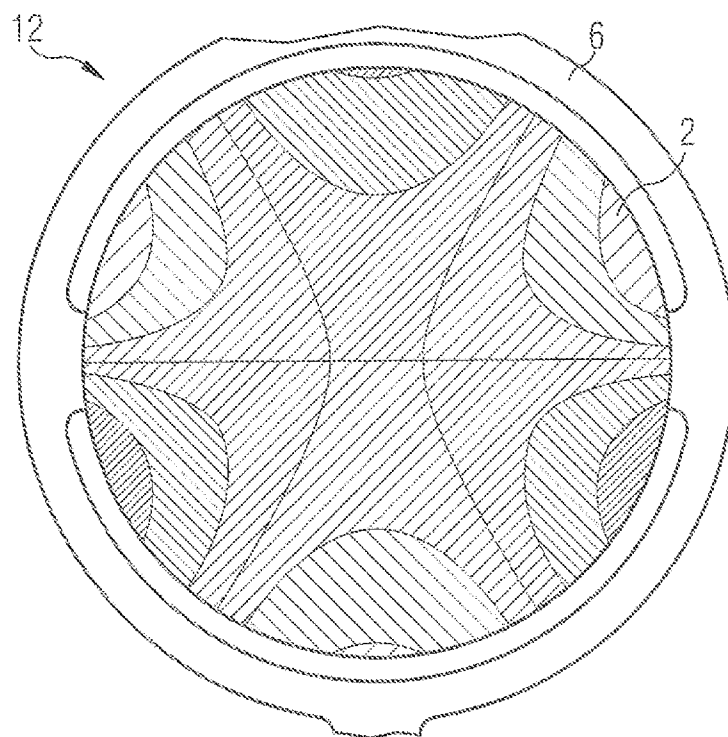


FIG 9B



8/10

FIG 10A

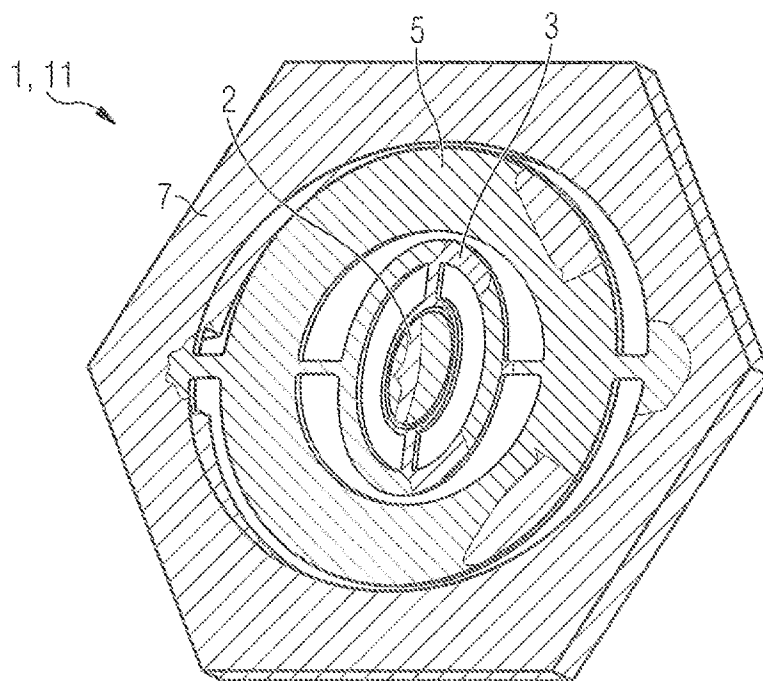
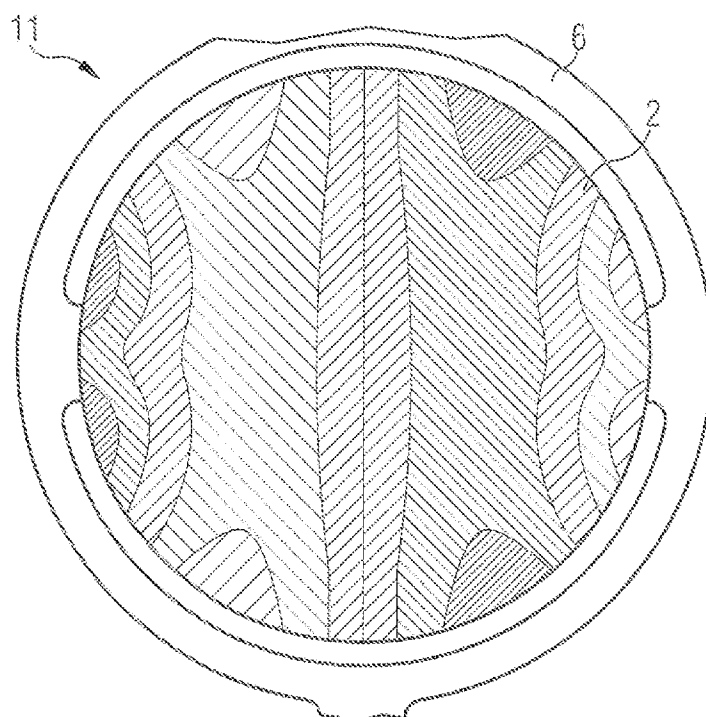


FIG 10B



9/10

FIG 11

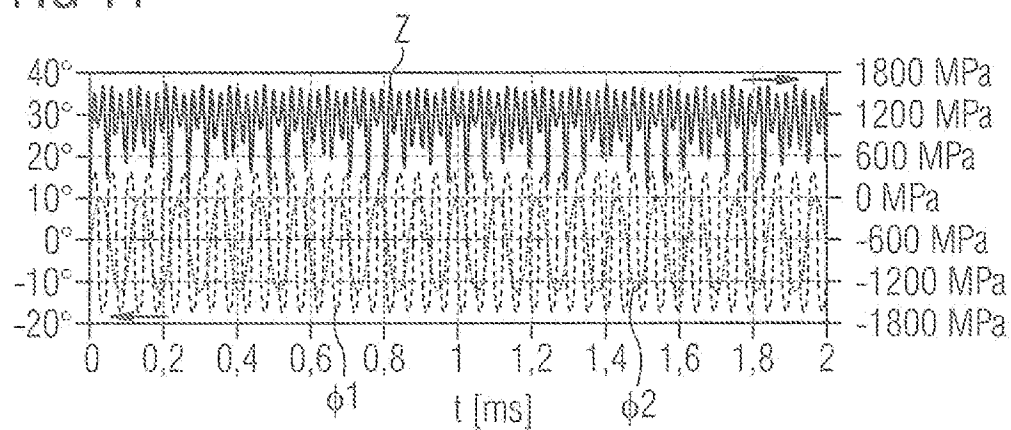
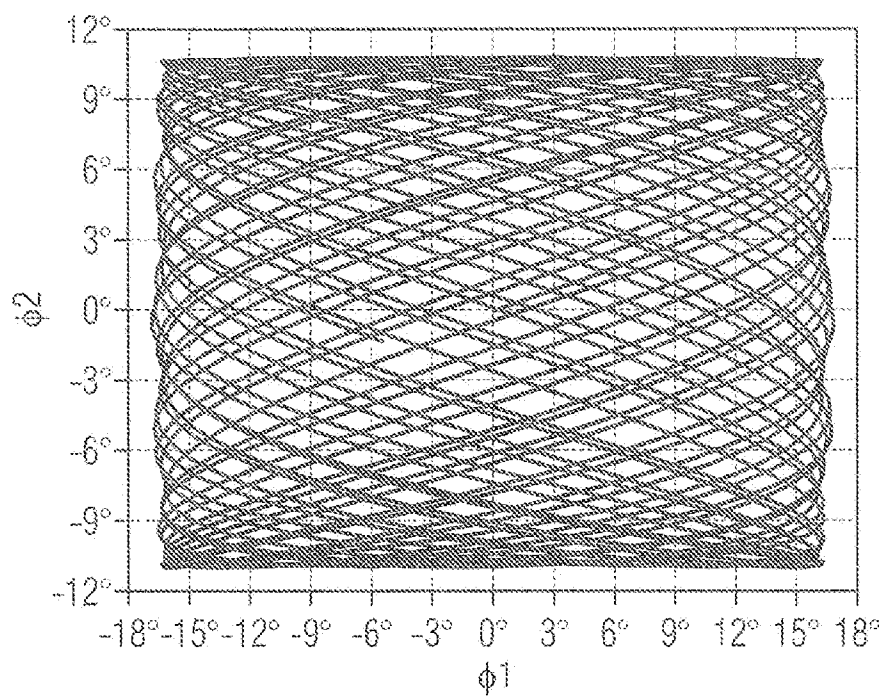


FIG 12



10/10

FIG 13

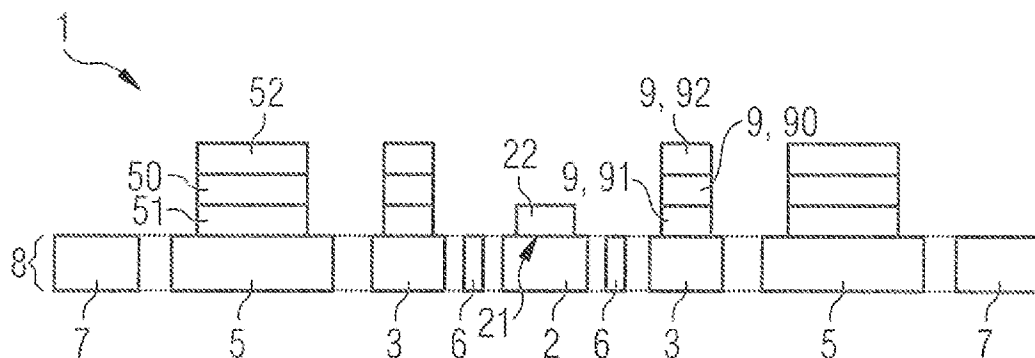


FIG 14

