



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 001 516 B3** 2008.04.30

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 001 516.1**

(22) Anmeldetag: **10.01.2007**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **30.04.2008**

(51) Int Cl.⁸: **B81B 3/00** (2006.01)

H03H 3/00 (2006.01)

G02B 26/08 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

(74) Vertreter:

**Schoppe, Zimmermann, Stöckeler & Zinkler, 82049
Pullach**

(72) Erfinder:

**Grasshoff, Thomas, 01129 Dresden, DE; Klose,
Thomas, 01109 Dresden, DE; Sandner, Thilo, Dr.,
01109 Dresden, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 40 32 559 C2

DE10 2004 045528 B4

DE 197 09 913 A1

US 63 31 909 B1

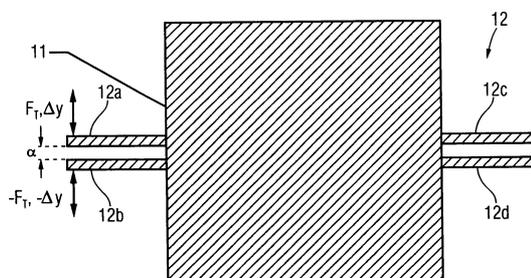
US 62 85 489 B1

US 62 56 131 B1

WO 2004/0 92 745 A1

(54) Bezeichnung: **Mikromechanisches Bauelement mit einstellbarer Resonanzfrequenz durch Geometrieänderung und Verfahren zum Betreiben desselben**

(57) Zusammenfassung: Ein beschriebenes mikromechanisches Bauelement umfasst ein Schwingungssystem, das einen Schwingungskörper (11) und eine elastische Aufhängung (12), mittels der der Schwingungskörper (11) schwingfähig aufgehängt ist, aufweist. Die elastische Aufhängung weist zumindest zwei Federbalken auf. Eine Einrichtung zum Einstellen einer Resonanzfrequenz des Schwingungssystems durch Änderung der Lage der zumindest zwei Federbalken der elastischen Aufhängung (12) zueinander ist vorgesehen.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein mikromechanisches Bauelement mit einstellbarer Resonanzfrequenz durch Geometrieänderung, die beispielsweise in Verbindung mit resonanten Mikroscooperspiegeln geeignet ist, und ein Verfahren zum Betreiben desselben.

[0002] Mikromechanische Bauelemente mit Schwingungssystemen kommen sowohl als mikromechanische Sensoren als auch als mikromechanische Aktoren zum Einsatz. Das aus Schwingungskörper und elastischer Aufhängung bestehende Schwingungssystem weist eine Eigen- bzw. Resonanzfrequenz auf. Bei vielen Anwendungen muss die Resonanzfrequenz des Schwingungssystems einer fest vorgegebenen Frequenz entsprechen, um unter Ausnutzung der Resonanzhöhung im Fall eines Sensors beispielsweise eine ausreichende Empfindlichkeit und im Fall eines Aktors beispielsweise eine ausreichende Schwingungsamplitude zu erzielen. Beispiele für solche mikromechanischen Bauelemente mit einem Schwingungssystem sind Taktgeber in Uhren oder ablenkende Spiegel, wie z.B. Scannerspiegel, die für die Datenprojektion verwendet werden. Bei den letztgenannten Scannerspiegeln muss beispielsweise die Driftfrequenz bzw. die Modulationsfrequenz und die Schwingungsfrequenz in einem fest vorgegebenen Verhältnis stehen. Ein weiteres Beispiel für eine Anwendung, bei der eine Sollfrequenz vorgegeben ist, liegt vor, wenn ein Paar eines Sensors bzw. eines Aktors, die im Prinzip baugleich sind, miteinander synchronisiert werden sollen.

[0003] Um die für die Schwingungsgeneration aufzuwendende Leistung gering zu halten, besitzen die Schwingungssysteme solcher Bauelemente im allgemeinen eine verhältnismäßig hohe Güte, mit der Konsequenz, dass die Resonanzkurve schmal ist und dass unter Beibehaltung der gewünschten Schwingungsamplitude nur ein sehr geringer Spielraum bei der Anregungsfrequenz besteht.

[0004] Die Ursachen für eine Abweichung der Resonanzfrequenz des Schwingungssystems eines mikromechanischen Bauelements von einer Soll-Resonanzfrequenz sind äußerst vielseitig und können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden, nämlich solche, die trotz identischer und konstanter Umgebungsbedingungen zu einer konstanten Resonanzfrequenzabweichung bzw. einem Resonanzfrequenz-Offset führen und beispielsweise durch Produktions- bzw. Herstellungsschwankungen/Toleranzen bedingt sind, und solche, die zeitlichen Änderungen unterworfen sind, und/oder beispielsweise durch Umgebungsbedingungsschwankungen hervorgerufen werden. Im Folgenden wird für die konstante, beispielsweise herstellungsbedingte Abweichung der tatsächlichen Resonanzfrequenz eines mikromecha-

nischen Bauelements von seiner Soll-Resonanzfrequenz der Begriff „Resonanzfrequenzabweichung“ verwendet, während für die während des Betriebs bzw. der Lebensdauer zeitlichen Änderungen unterworfenen Frequenzabweichungen der Begriff „Resonanzfrequenzschwankung“ verwendet wird.

[0005] Unter dem Begriff „Resonanzfrequenzabweichung“ fällt folglich beispielsweise auch das Nicht-Übereinstimmen der Resonanzfrequenz im Prinzip baugleicher Bauelemente, welches trotz identischer und konstanter Umgebungsbedingungen auftritt. Die Ursache hierfür sind Variationen frequenzbestimmender Materialparameter, wie z.B. elastischer Konstanten, der Dichte usw., und statischer bzw. systematischer Abweichungen der Dimensionen von Feder und Masse bzw. dämpfend wirkender Zwischenräume aufgrund von Toleranzen in Justage, Strukturierung und Schichtgeneration bei der Herstellung der mikromechanischen Bauelemente.

[0006] Unter dem Begriff Resonanzfrequenzschwankung wird demgegenüber die Schwankung der Resonanzfrequenz des Schwingungssystems eines mikromechanischen Bauelements aufgrund von beispielsweise Umgebungsbedingungsschwankungen verstanden, wie z.B. Schwankungen des Drucks oder der Temperatur. Resonanzfrequenzschwankungen können aber auch durch unterschiedlich stark ausgeprägte Absorption von unterschiedlichen Gas-Molekülen, Feuchtigkeit und ähnlichem an dem Schwingungssystem oder durch zeitliche Veränderungen der Materialparameter hervorgerufen werden.

[0007] Die bisher bekannten Maßnahmen zur Einstellung der Resonanzfrequenz des Schwingungssystems eines mikromechanischen Bauelements auf eine Soll-Resonanzfrequenz können ebenfalls in zwei Strategietypen unterteilt werden, nämlich in eine Strategie, nach welcher quasi als einer der letzten Herstellungsschritte nicht reversible Änderungen an den mikromechanischen Bauelementen zur Anpassung der Resonanzfrequenz des Schwingungssystems vorgenommen werden, und eine Strategie, nach welcher die Resonanzfrequenz des Schwingungssystems während des Betriebs auf die Soll-Resonanzfrequenz korrigiert, wie z.B. über eine Regelschleife nachgeregelt, wird. Die erste Strategie ist freilich lediglich für die Kompensation dauerhafter Resonanzfrequenzabweichungen geeignet und kann bei einigen Anwendungen, die eine Kompensation auch der Resonanzfrequenzschwankungen benötigen, eine während des Betriebs erfolgende Resonanzfrequenzkorrektur nicht ersetzen.

[0008] Zur Regelung der Resonanzfrequenz während des Betriebs existieren verschiedene Ansätze. In der US 6 331 909 B1 und der US 6 285 489 B1 wird eine Resonanzfrequenzregelung beschrieben, bei

der zur Änderung der Resonanzfrequenz der Umgebungsdruck variiert wird, wodurch sich die effektive Masse des bewegten Elements bzw. des Schwingungskörpers durch die Gasbelegung und damit auch die Resonanzfrequenz des Feder-Masse-Systems ändert. Die hierfür notwendige Apparatur und der Regelkreis sind jedoch verhältnismäßig aufwändig. Ferner wird ein Ausführungsbeispiel beschrieben, bei dem die Feder des Feder-Masse-Systems mit einem gasabsorbierenden Material belegt ist, das bei Absorption die Materialeigenschaften und damit die Frequenz ändert. Auch hier besteht der Nachteil in dem verhältnismäßig hohen Aufwand. Zudem ist davon auszugehen, dass durch die Einschränkungen der Auswahl der für die Feder zur Verfügung stehenden Materialien als solche des gasabsorbierenden Typs die Güte des Systems herabgesetzt wird, beispielsweise nicht optimal ist.

[0009] In der US 6 256 131 B1 und der US 6 285 489 B1 wird ein Torsionsschwingungssystem beschrieben, bei dem ein Teil der sich drehenden Masse mittels elektrostatischer Kräfte von der Torsionsachse weg bzw. zu der Torsionsachse hin verschoben werden kann. Hierdurch ändert sich das Trägheitsmoment und damit wiederum die Resonanzfrequenz. Dieses Vorgehen ermöglicht zwar eine Regelung der Resonanzfrequenz, größere Abweichungen sind jedoch aufgrund der im allgemeinen geringen Translationswege der beweglichen Masse nicht zu korrigieren. Durch zusätzliche elektrische Leitungen durch die elastische Aufhängung bzw. Torsionsfedern oder auf den Torsionsfedern, ist diese Ausführung aufwändig und führt zu einem erhöhten Platzbedarf auf der Spiegelplatte. Dadurch vergrößert sich auch die dynamische Deformation.

[0010] In einer anderen Ausführung wird gemäß der WO 2004/092745 A1 ein mikromechanisches Bauelement mit anpassbarer Resonanzfrequenz beschrieben. Mit Hilfe von geometrischen Strukturen, beispielsweise Stegen, die durch äußeren Einfluss gezielt gebrochen werden können, wird auf irreversible und diskrete Weise die effektive Länge und damit die Steifigkeit von mikromechanischen Federelementen beeinflusst. Während des Betriebs kann durch Anlegen einer Spannungsdifferenz zwischen Schwingungskörper und geeignet angeordneten stationären Elektroden eine virtuelle Federkonstantenerhöhung bzw. Verringerung erzielt werden.

[0011] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht folglich darin, ein Konzept zur kombinierten Einstellung und Abstimmung einer Resonanzfrequenz eines mikromechanischen Bauelements zu schaffen, die während des Betriebs des mikromechanischen Bauelements möglich und weniger aufwändig ist.

[0012] Diese Aufgabe wird durch ein mikromechanisches Bauelement gemäß Anspruch 1, eine Lichtab-

lenvorrichtung nach Anspruch 15 und ein Verfahren zum Betreiben eines mikromechanischen Bauelements gemäß Anspruch 16 gelöst.

[0013] Ein erfindungsgemäßes mikromechanisches Bauelement umfasst ein Schwingungssystem, das einen Schwingungskörper und eine elastische Aufhängung, mittels der der Schwingungskörper schwingfähig aufgehängt ist, aufweist, sowie eine Einrichtung zum Einstellen einer Resonanzfrequenz des Schwingungssystems durch Änderung der Lage zumindest zweier Federbalken der elastischen Aufhängung zueinander.

[0014] Ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Betreiben eines mikromechanischen Bauelements mit einem Schwingungssystem, das einen Schwingungskörper und eine elastische Aufhängung, mittels der der Schwingungskörper schwingfähig aufgehängt ist, aufweist, umfasst das Einstellen einer Resonanzfrequenz des Schwingungssystems durch Änderung der Lage der zumindest zwei Federbalken der elastischen Aufhängung zueinander.

[0015] Der vorliegenden Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass durch Verändern der jeweiligen Federgeometrie, insbesondere Ändern der Lage der zumindest zwei Federbalken zueinander, eine Änderung der Federkonstante der elastischen Aufhängung erzielt werden kann, die wiederum eine Änderung bzw. Einstellbarkeit und Regelung des Schwingungssystems bzw. des Feder-Masse-System liefert. Die Einstellung ist in kontinuierlichen oder in diskreten Schritten möglich. Zudem beschränken sich die vorzunehmenden Hinzufügungen zu dem mechanischen Schwingungssystem auf das Vorsehen elektrischer Strukturen, wie sie mittels mikromechanischer Herstellungsverfahren problemlos und kostengünstig herstellbar sind und wie sie bei elektrostatischer Anregung des Schwingungssystems ohnehin vorgesehen werden müssen.

[0016] Bei einem mikromechanischen Bauelement gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung ist neben der Einstellbarkeit der Resonanzfrequenz des Schwingungssystems durch Ändern der jeweiligen Federgeometrie mittels mikromechanischer Aktoren, eine Einrichtung zur irreversiblen und reversiblen Korrektur von dauerhaften Resonanzfrequenzabweichungen vorgesehen. Hierdurch wird eine kombinierte Einstellungs- und Regelfähigkeit geliefert, um sowohl Resonanzfrequenzabweichungen als auch Schwankungen ausgleichen zu können. Hiermit wird die Ausbeute bei der Fertigung signifikant erhöht, da mikromechanische Bauelemente, die unmittelbar nach ihrer Herstellung eine Resonanzfrequenz aufweisen, die außerhalb des Frequenzbereichs liegt, nicht ausgesondert werden müssen, sondern durch irreversible und reversible Kompensationen derart manipuliert werden können, dass ihre Re-

sonanzfrequenz ausreichend nah an der Soll-Resonanzfrequenz ist. Zum anderen ermöglicht die vorliegende Erfindung, dass die Resonanzfrequenz über einen geeignet großen Bereich in hinreichend kleinen Schritten einstellbar ist, beispielsweise kontinuierlich einstellbar ist, so dass die Soll-Frequenz, welche im Betrieb Schwankungen unterliegt, regelbar ist.

[0017] Gemäß einem speziellen Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung umfasst ein mikromechanisches Bauelement einen über vier parallele Federbalken, beispielsweise Torsionsfedern, zu Kippbewegungen fähigen, aufgehängten Schwingungskörper. Die Federn sind jeweils an einer Seite in einem begrenzten Bereich beweglich gelagert. Je nach Fertigungsschwankungen bzw. Resonanzfrequenzabweichung, sind Änderungen der Federsteifigkeit durch ein gezieltes Verändern der jeweiligen Federgeometrie möglich. Durch das kontrollierte, diskrete oder kontinuierliche Verschieben beider Balkenelemente der Parallelfeder mittels eines mikromechanischen Aktors wird eine Änderung der Federsteifigkeit erzielt.

[0018] Bei einem Ausführungsbeispiel kann eine diskrete Änderung der Resonanzfrequenz durch stufenweises Einrasten von einem beweglichen Einrastelement am Ende der beweglichen Federbalkenelemente realisiert werden.

[0019] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung können insbesondere zur Abstimmung der Eigenresonanz resonanter Mikroscannerspiegel durch Ändern der Federgeometrie, wie z.B. V-Feder, Parallelfeder, mit beliebigen Aktoren, beispielsweise elektrostatisch, thermisch, magnetisch oder piezoelektrisch, verwendet werden. Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung beziehen sich auf resonante MEMS-Scannerspiegel, d.h. auf Aktoren, die im Zustand der Resonanzhöhung betrieben werden, um große Schwingungsamplituden bei geringer Leistungsaufnahme zu erreichen. Da die resultierende Güte vergleichsweise hoch und die Resonanzkurve somit schmal ist, besteht unter Beibehaltung der gewünschten Schwingungsamplitude ein nur sehr geringer Spielraum bei der Anregungsfrequenz.

[0020] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung betreffen eine kombinierte Einstellung und Abstimmung der Resonanzfrequenz, so dass auch größere Abweichungen und Schwankungen der Resonanzfrequenz ausgeglichen werden können, um somit das Anwendungsgebiet des Scannerspiegels zu vergrößern. Eine kritische Anwendung ist hierbei die Datenprojektion, bei der die Datenfrequenz und die Schwingungsfrequenz des Spiegels in einem fest vorgegebenen Verhältnis stehen müssen. Ebenso ergibt sich die Vorgabe einer Frequenz dann, wenn zwei im Prinzip baugleiche Sensoren/Aktoren oder zwei in einem festen Verhältnis schwingende Scan-

nerspiegel miteinander synchronisiert werden sollen. Ein Beispiel hierfür ist beispielsweise ein zweidimensionaler Scanner, der ein Auslesen von zweidimensionalen Barcodes über ein diagonales progressives Scannen ermöglicht. Bei einer solchen Anwendung ist, einerseits ein festes Frequenzverhältnis nötig, um eine vorgegebene, feste Lissajous-Figur zu definieren. Andererseits sollen sich die Frequenzen in beiden Schwingungsrichtungen nur um wenige Hertz unterscheiden. Dieser geforderte Frequenzunterschied liegt jedoch innerhalb der technologisch bedingten Frequenzstreuung. Entscheidend für den Erfolg eines solchen Prinzips ist somit nicht das exakte Einstellen der Frequenzen in den beiden Schwingungsrichtungen, sondern das Erreichen des durch diese Frequenzen definierten Verhältnisses. Dies ist jedoch stark von Abweichungen und Schwankungen der Resonanzfrequenz abhängig. Solche Resonanzfrequenzabweichungen und Resonanzfrequenzschwankungen können über eine Einstellung der Resonanzfrequenz einer oder beider Achsen kompensiert werden, wobei hierin unter Einstellung sowohl eine nicht-reversible, d.h. die Frequenzänderung kann nicht rückgängig gemacht werden, als auch eine reversible Änderung bzw. Anpassung der Resonanzfrequenz gemeint ist. Resonanzfrequenzschwankungen sind nicht über solche Einstellungen zu beheben, sondern sollten momentan, also im Betrieb und immer reversibel, also vorzugsweise über eine Regelschleife ausgeglichen werden.

[0021] Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung beziehen sich somit auf eine Lichtablenkvorrichtung, die ein mikromechanisches Bauelement mit entsprechend einstellbarer Resonanzfrequenz und eine Antriebseinrichtung zum Betreiben des Schwingungssystems des mikromechanischen Bauelements bei der Resonanzfrequenz aufweist. Ferner umfassen Ausführungsbeispiele der Erfindung eine Regeleinrichtung, beispielsweise eine Regelschleife, um die Resonanzfrequenz des Schwingungssystems auf eine Sollresonanzfrequenz einzustellen. Als Regelgröße kann hierbei beispielsweise die Schwingungsamplitude des Schwingungskörpers bzw. des Spiegels dienen.

[0022] Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend bezugnehmend auf die beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

[0023] [Fig. 1](#) eine Darstellung des Schwingungssystems eines mikromechanischen Bauelements, beispielsweise eines resonanten Scannerspiegels, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

[0024] [Fig. 2](#) eine Darstellung der Aufhängung eines mikromechanischen Bauelements, beispielsweise eines resonanten Scannerspiegels mit zwei paral-

lenen Federbalken bzw. Torsionsfedern, die zum Abstimmen durch Geometrieänderung geeignet sind, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0025] [Fig. 3a](#) bis [Fig. 3d](#) Darstellungen von Basisfedergeometrien zum Geometrietuning mikromechanischer Oszillatoren, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

[0026] [Fig. 4a](#) bis [Fig. 4d](#) Darstellungen von Basisfedergeometrien mit einseitig fest eingespanntem stabilisierendem mittlerem Federbalken, gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

[0027] [Fig. 5a](#) bis [Fig. 5d](#) Darstellungen von Basisfedergeometrien mit veränderlichen parallelen Federstrukturen, gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

[0028] [Fig. 6](#) eine Darstellung des reversiblen Einrastens bei einer Parallelfedergeometrie zur diskreten Frequenzänderung, gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

[0029] [Fig. 7](#) eine Darstellung des irreversiblen Einrastens bei einer Parallelfedergeometrie zur diskreten Frequenzänderung, gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung.

[0030] Bevor im Folgenden die vorliegende Erfindung anhand der beiliegenden Zeichnungen näher erläutert wird, wird darauf hingewiesen, dass die Zeichnungen zur besseren Verständlichkeit nicht maßstabsgerecht ausgeführt sind. Zudem sind in den Figuren gleiche Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen, wobei eine wiederholte Beschreibung dieser Elemente weggelassen wird.

[0031] [Fig. 1](#) zeigt eine vereinfachte Darstellung eines resonanten mikromechanischen Bauelements mit veränderlicher Parallelfedergeometrie. Das mikromechanische Bauelement des vorliegenden Ausführungsbeispiels stellt einen mikromechanischen Spiegel dar, wie er beispielsweise bei Mikroskannern eingesetzt wird, um einen modulierten Lichtstrahl mit einer vorbestimmten Soll-Frequenz abzulenken, um den Lichtstrahl in einem Bildfeld mit der Soll-Frequenz hin- und herzubewegen, wodurch durch den sich auf dem Bildfeld bewegenden modulierten Lichtstrahl auf dem Bildfeld ein Bild erzeugt wird. Es wird darauf hingewiesen, dass die vorliegende Erfindung auch bei anderen mikromechanischen Bauelementen mit einem Schwingungssystem verwendet werden kann.

[0032] Das mikromechanische Bauelement umfasst ein Schwingungssystem aus einem Schwingungskörper **11**, der als Spiegelplatte dient, und einer elas-

tischen Aufhängung **12** bzw. **12a**, **12b**, **12c** und **12d**. Sowohl Schwingungskörper **11** als auch elastische Aufhängung **12** könnten beispielsweise in einer Halbleiterschicht gebildet sein. Die Aufhängung **12** besteht aus vier flachen und länglichen Torsionsfedern **12a**, **12b**, **12c** und **12d**, welche an einem Ende in einem begrenzten Bereich beweglich gelagert sind und an dem anderen Ende an einer jeweils gegenüberliegenden länglichen Seite des rechteckigen, als Spiegel dienenden Schwingungskörpers **11** befestigt sind. Die gesamte Konstruktion könnte beispielsweise von einem Substrat getragen werden, wie es für bekannte Schwingungssysteme in der WO 2004/092745 A1 beschrieben ist.

[0033] Das in [Fig. 1](#) gezeigte mikromechanische Bauelement liefert bereits eine Einstellbarkeit der Resonanzfrequenz des Schwingungssystems aus Schwingungskörper **11** und elastischer Aufhängung **12** entweder auf diskrete oder auf kontinuierliche Weise, um die in der Beschreibungseinleitung beschriebenen herstellungsbedingten dauerhaften Resonanzfrequenzabweichungen oder dergleichen von der Soll-Resonanzfrequenz auszugleichen, wobei diese Einstellbarkeit im Folgenden näher erläutert wird. Die Einstellung der Resonanzfrequenz wird über die Federsteifigkeit des Feder-Masse-Systems, beispielsweise des Schwingungssystems aus Schwingungskörper **11** und elastischer Aufhängung **12** ermöglicht. Dabei ist das Quadrat der Eigenfrequenz eines linearen Oszillators direkt proportional zur Federsteifigkeit:

$$f^2 \sim k$$

[0034] Eine Änderung der Federsteifigkeit wird durch ein gezieltes Verändern der jeweiligen Federgeometrie erreicht. Durch das kontrollierte diskrete oder kontinuierliche Verschieben beider Balkenelemente der Parallelfeder nach außen vergrößert sich der effektive Abstand der Federbalken und somit der Biegeanteil der Federsteifigkeit. Dadurch vergrößert sich die Gesamtsteifigkeit des Scannerspiegels. Umgekehrt verkleinert sich die Gesamtsteifigkeit beim Verschieben der Federbalken nach innen, aufgrund des verringerten Biegeanteils. Die Gesamtsteifigkeit setzt sich aus einem Torsionsanteil k_T und einem Biegeanteil k_B zusammen:

$$k_G = 2 \cdot (k_T + k_B)$$

[0035] Der Biegeanteil ist hierbei direkt proportional zum Quadrat des Abstandes a bzw. zur Änderung des Abstandes Δa der parallelen Biegebalken:

$$k_B \sim \Delta a^2$$

wenn ein mechanisches Einrasten möglich ist und dadurch eine Änderung von a durch die bei der Verdrillung der Spiegelfeder entstehende Rückstellkraft

unterdrückt wird.

[0036] Berücksichtigt man, dass die Abstandsänderung Δa proportional zu einer Tuningkraft F_T ist, und geht man davon aus, dass der Abstand a nicht durch ein mechanisches Einrasten beim Verdrillen der Torsionsfeder konstant bleibt, wird der Biegeanteil direkt proportional zum Quadrat der Tuningkraft, die die Abstandsänderung bewirkt:

$$k_B \sim F_T^2$$

[0037] Die Tuningkraft F_T ist dabei die zum Ändern der Federgeometrie bzw. zum Bewirken der positiven oder negativen Abstandsänderung Δa notwendige Kraft. Zum Erzeugen dieser Tuningkraft können übliche in Mikrosystemen verwendbare Aktoren genutzt werden. Das heißt, elektrostatische, piezoelektrische oder elektrisch-thermische Aktorprinzipien sind möglich.

[0038] Elektrostatische Antriebe, die auf der Änderung der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit vom Weg beruhen, können hierbei entweder nach dem Prinzip eines Plattenkondensators, bei dem die Bewegung in Richtung der elektrischen Feldlinien, oder nach dem Prinzip eines Fingerkondensators mit einer Bewegung senkrecht zu den elektrischen Feldlinien, realisiert werden.

[0039] Bei elektrothermischen Aktoren sind z.B. Ausführungen nach dem Prinzip einer unsymmetrischen Ausdehnung von einzelnen Schichten in Mehrschichtsystemen (Biege wandler) aufgrund von unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten möglich. Diese können in der Schwingungskörperebene bzw. Spiegelebene oder senkrecht zur Schwingungskörperebene liegen.

[0040] Piezoelektrische Antriebe, die den reziproken Piezo-Effekt nutzen, um unsymmetrische Ausdehnungen zu erzeugen, sind ebenfalls als Biege wandler nutzbar. Sie können jedoch nur senkrecht zur Schwingungskörperebene bzw. Spiegelebene eingesetzt werden, was durch eine geeignete Umsetzung der erzeugten Kraftwirkung in der Plattenebene geändert werden kann.

[0041] In Abhängigkeit vom Betrag der mit dem jeweiligen Aktor erzeugten Kraft und der dadurch bedingten Lageänderung der Federbalken zueinander, kann die Gesamtsteifigkeit des Schwingungssystems geändert werden, so dass dadurch die Resonanzfrequenz regelbar ist.

[0042] Bei der Ausführung des oben beschriebenen Prinzips zur Änderung der Resonanzfrequenz sind allgemein drei Szenarien möglich.

[0043] Bei einem ersten Szenario erfolgt eine stu-

fenweise Einstellung (irreversibel oder reversibel) der Resonanzfrequenz durch stufenweise Änderung des Abstands zwischen den Federbalken mittels mechanischen Einrastens der verschiebbaren Federbalken und der jeweiligen notwendigen Tuningkraft. Bei diesem Szenario erfolgt eine Einstellung der Frequenz, nicht jedoch eine Regelung derselben.

[0044] Bei einem zweiten Szenario wird eine konstante Aktorkraft an die verschiebbaren Federelemente angelegt, wodurch der Biegeanteil k_b abhängig vom mechanischen Auslenkwinkel wird. Dadurch ist eine Änderung der Federcharakteristik möglich, wobei eine lineare, degressive oder progressive Federkennlinie erzwungen werden könnte.

[0045] Bei einem dritten Szenario wird die Resonanzfrequenz durch eine Änderung der Gesamtsteifigkeit in Abhängigkeit von der Aktorkraft geregelt. Hierbei kann die gewünschte Resonanzfrequenz, d.h. die dazugehörige Gesamtsteifigkeit, nachgeregelt werden.

[0046] [Fig. 2](#) zeigt ein Ausführungsbeispiel einer beweglichen Federbalkenaufhängung, die allgemein mit **20** bezeichnet ist. Wie in [Fig. 2](#) gezeigt ist, sind die zwei parallelen Federbalken bzw. Torsionsfedern **12c** und **12d** an einem Ende an dem Schwingungskörper **11** befestigt und am anderen Ende über elastische Aufhängungen **24** und **26** an einer Trägerstruktur **22** beweglich gelagert. Die elastischen Aufhängungen **24** und **26** sind symmetrisch bezüglich einer Achse A_x , die eine Schwenkachse des Schwingungskörpers darstellt, aufgebaut und umfassen jeweils einen Balken **2a** und **2b** sowie flexible Stege **2c**, **2d** und **2e** bzw. **2f**, **2g** und **2h**. Ein erstes Ende des Balkens **2a** ist auf einer Seite mit dem Federbalken **12c** verbunden und auf der anderen Seite desselben mit dem flexiblen Steg **2e**. Das andere Ende des flexiblen Stegs **2e** ist mit der Trägerstruktur **22** verbunden. Ein zweites, gegenüberliegendes Ende des Balkens **2a** ist auf beiden Seiten desselben über die flexiblen Stege **2c** und **2d** mit sich gegenüberliegenden Abschnitten der Trägerstruktur **22** verbunden. Der Aufbau der elastischen Aufhängung **26** ist entsprechend, so dass eine gesonderte Beschreibung desselben nicht erforderlich ist.

[0047] Während des Betriebs kann durch eine geeignete Antriebseinrichtung eine Betätigungskraft, die oben als Tuningkraft F_T bezeichnet wurde, an die Balken **2a** und **2b** angelegt werden, so dass eine Auslenkung derselben und dadurch eine Änderung des Orts, an dem die Federbalken an der Trägerstruktur **22** gelagert sind, bewirkt werden. Bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel können die Balken **2a** und **2b** dabei durch Ausüben einer entsprechenden Kraft F_T bzw. $-F_T$ um eine Strecke Δy bzw. $-\Delta y$ ausgelenkt werden. Die Stege **2c** bis **2h** weisen eine ausreichende Flexibilität auf, um eine solche Auslen-

kung zu ermöglichen.

[0048] Die in [Fig. 2](#) gezeigten Strukturen können beispielsweise in einer Schicht eines mikromechanischen Bauelements strukturiert sein. Mikromechanische Aktoren (in [Fig. 2](#) nicht gezeigt) können vorzugsweise in das Bauelement integriert sein, oder außerhalb des Bauelements angebracht werden. Derartige Aktoren könnten bei dem in [Fig. 2](#) gezeigten Ausführungsbeispiel beispielsweise implementiert sein, indem an den Balken **2a** und **2b** Fingerelektroden vorgesehen sind, deren Längserstreckung senkrecht zur Längserstreckung der Balken **2a** ist. Solche Fingerelektroden können entsprechenden feststehenden Elektroden gegenüberliegen, so dass durch Anlegen einer Spannung zwischen den Fingerelektroden und feststehenden Elektroden eine entsprechende Auslenkung bewirkt werden kann. Derartige mikromechanische Antriebe unter Verwendung interdigitaler Finger sind in der Technik bekannt und bedürfen hierin keiner weiteren Erläuterung.

[0049] An dieser Stelle sei angemerkt, dass die, Bezug nehmend auf [Fig. 2](#) beschriebene elastische bzw. weiche Aufhängung an einer Trägerstruktur für sämtliche hierin beschriebenen beweglichen Lagerungen verwendet werden kann. Ferner sei darauf hingewiesen, dass eine Lageänderung zwischen zwei Federbalken auch erreicht werden kann, wenn nur einer der Federbalken an der Trägerstruktur beweglich gelagert ist, beispielsweise unter Verwendung von einer der beiden elastischen Aufhängungen **24** und **26**, die in [Fig. 2](#) gezeigt sind.

[0050] [Fig. 3a](#) bis [Fig. 3d](#) zeigen Ausführungsbeispiele von Basisfedergeometrien zum Geometrietuning mikromechanischer Oszillatoren, beispielsweise Scannerspiegeln. Die Basisfedergeometrien zeichnen sich dadurch aus, dass die Feder jeweils auf einer Seite an dem Schwingungskörper, beispielsweise der Spiegelplatte **11** befestigt ist und auf der anderen Seite in einem begrenzten Bereich beweglich gelagert ist.

[0051] [Fig. 3a](#) zeigt die Spiegelplatte **11** mit zwei parallelen Federbalken **12c** und **12d**. Die hier dargestellten Bewegungsrichtungen der elastischen Aufhängung bzw. der Federbalken **12c** und **12d** können grundsätzlich in positiver oder negativer y -Richtung erfolgen. Durch Anlegen einer Aktorkraft F_T an die verschiebbaren Federbalken **12c** und **12d** wird eine Änderung der Federcharakteristik möglich. Der Biegeanteil der Federsteifigkeit k_B ist abhängig von dem mechanischen Auslenkwinkel. Bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel können die Balken **12a** und **12b** dabei durch Ausüben einer entsprechenden Kraft F_T bzw. $-F_T$ um eine Strecke Δy bzw. $-\Delta y$ ausgelenkt werden. Lineare, degressive oder progressive Federkennlinien könnten im optimalen Fall erzwungen werden. Eine Regelung der Resonanzfrequenz auf eine

Soll-Frequenz wird durch eine Änderung der Gesamtsteifigkeit in Abhängigkeit von der Aktorkraft möglich.

[0052] [Fig. 3b](#) zeigt die Spiegelplatte **11** mit zwei Federbalken **31a** und **31b** in einer V-förmigen Ausführung der Federgeometrie. [Fig. 3c](#) zeigt die Spiegelplatte **11** mit drei Federbalken **32a**, **32b** und **32c** in einer Y-förmigen Ausführung der Federgeometrie. [Fig. 3d](#) zeigt die Spiegelplatte **11** mit zwei Federbalken **33a** und **33b**, die einander kreuzen, um eine X-förmige Federgeometrie zu realisieren.

[0053] In [Fig. 4a](#) bis [Fig. 4d](#), die sich auf jeweilige Ausführungsbeispiele der Federgeometrie beziehen, sind die Basisfedergeometrien jeweils um ein mittleres, fest eingespanntes Federbalkenelement **40a**, **40b**, **40c** und **40d** erweitert. Die fest eingespannten Federbalkenelemente sind an der Trägerstruktur **22**, beispielsweise dem Bauelementrahmen fixiert. Dieses Federbalkenelement erhöht die Stabilität der Gesamtfeder und vergrößert somit die Steifigkeiten sowohl gegenüber Bewegungen in der Spiegelplattenebene, als auch gegenüber Bewegungen senkrecht zur Spiegelplattenebene. Hierdurch lassen sich Eigenschaften des Mikroscoannerspiegels, wie z.B. Modentrennung, Schockfestigkeit oder elektrostatische Stabilität verbessern bzw. optimieren. Durch das Verwenden von zwei oder mehr fest eingespannten Federbalken kann die Stabilität beliebig vergrößert werden.

[0054] [Fig. 5a](#) zeigt ein Ausführungsbeispiel, das sich von dem in [Fig. 4a](#) gezeigten Ausführungsbeispiel dadurch unterscheidet, dass jeweils Paare aus zwei parallelen Federbalken, **50a** und **50b** bzw. **50c** und **50d**, statt jeweils eines Federbalkens vorgesehen sind. Die parallelen Federbalken **50a** und **50b** können gleichzeitig in eine Richtung verschoben werden. Beispielsweise können bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel die Balken **50c** und **50d** durch Ausüben einer Kraft F_T gleichzeitig um eine Strecke Δy ausgelenkt werden. Hierbei erhöht sich die mögliche Frequenzänderung pro Wegänderung Δy , bei jedoch erhöhtem Kraftaufwand F_T . Der Vorteil bei dieser Variante gegenüber einem einfachen Verbreitern der beweglichen Federbalken liegt in einer günstigeren Biegesteifigkeit der Federbalken in Bewegungsrichtung, da die Balkenbreite mit der dritten Potenz in diese Biegesteifigkeit eingeht.

[0055] Das in [Fig. 5b](#) gezeigte Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von dem in [Fig. 4b](#) gezeigten Ausführungsbeispiel ebenfalls dadurch, dass die beweglich gelagerten Federbalken **31a** und **31b** durch Federbalkenpaare **51a**, **51b** und **51c**, **51d** ersetzt sind.

[0056] Bei den in den [Fig. 5c](#) und [Fig. 5d](#) gezeigten Ausführungsbeispielen weisen im Vergleich zu den [Fig. 4c](#) und [Fig. 4d](#) jeweils beweglich gelagerte Fe-

derbalken doppelte Federbalken auf. So sind gemäß [Fig. 5c](#) mit einem Federbalken **52a**, der dem Federbalken **32a** in [Fig. 4c](#) entspricht, doppelte Federbalken **52b**, **52c** und **52d**, **52e** verbunden. Gemäß [Fig. 5d](#) sind verglichen mit [Fig. 4d](#) der jeweiligen beweglichen Lagerung, die durch einen jeweiligen Pfeil angedeutet ist, zugewandte Abschnitte der Federbalken durch jeweilige doppelte Federbalken **53a**, **53b** bzw. **53c**, **53d** gebildet.

[0057] Es ist klar, dass auch bei den in den [Fig. 3a](#) bis [Fig. 3d](#) gezeigten Ausführungsbeispielen die jeweiligen Federbalken durch doppelte Federbalken gebildet sein könnten. Darüber hinaus könnte alternativ und/oder zusätzlich auch die Lage der Federbalken innerhalb eines der Paare relativ zueinander änderbar sein, indem beispielsweise die Enden der Federbalken eines Paares von doppelten Federbalken beweglich relativ zueinander gelagert sind.

[0058] Die bisherigen Ausführungsbeispiele ermöglichen eine kontinuierliche und reversible Änderung der Resonanzfrequenz, um Resonanzfrequenzschwankungen während des Betriebs des Schwingungskörpers **11**, beispielsweise der Scannerspiegelplatte zu kompensieren und somit nachzuregeln.

[0059] [Fig. 6](#) zeigt eine Erweiterung der Beispiele aus [Fig. 4a](#), bei dem ein reversibles Einrasten möglich ist. Am Ende der Federbalken **60a** und **60b** befinden sich Einrastelemente E1 und E2 zum Einrasten der Federenden **60a** und **60b**. Diese Einrastelemente können beispielsweise durch einen zusätzlichen Aktor bewegt werden. Zuerst werden die Einrastelemente E1 und E2 mit Hilfe einer Kraft F_R um Δx verschoben, um ein Verschieben der beweglichen Balkenelemente **60a** und **60b** um Δy mittels einer Tuningkraft F_T reibungsfrei realisieren zu können. Danach werde die Einrastelemente E1 und E2 in ihre Ausgangsposition in x-Richtung zurückgeführt und somit die beweglichen Balkenelemente **60a** und **60b** eingerastet. Durch die beweglichen Einrastelemente, wie sie in [Fig. 6](#) gezeigt sind, kann eine diskrete Frequenzerhöhung oder Frequenzverringerung durch stufenweise reversibles Einrasten realisiert werden.

[0060] Das in [Fig. 7](#) gezeigte Ausführungsbeispiel stellt eine zweite Variante ohne bewegliches Einrastelement E vor. Hierbei erhöhen sich die Reibungsverluste und damit die notwendige Tuningkraft. Des Weiteren ist diese Variante aufgrund der großen Reibung am besten irreversibel ausführbar. Eine reversible Variante ist zwar denkbar, doch wären hier Materialbelastungen so groß, dass sich das Risiko einer Zerstörung der beiden Federbalken **70a** und **70b** stark erhöhen würde.

[0061] Mittels eines reversiblen oder irreversiblen Einrastens können somit Resonanzfrequenz-Abweichungen nach dem Herstellungsprozess über ein

einmaliges oder mehrmaliges stufenweises Ändern der elastischen Aufhängung **12** bzw. der Federgeometrie kompensiert werden.

[0062] Bezugnehmend auf die Ausführungsbeispiele der [Fig. 1](#) bis [Fig. 7](#) wurde ein Mikroskopspiegel als eine potentielle Anwendung der vorliegenden Erfindung beschrieben. Es ist jedoch klar, dass die vorliegende Erfindung auch bei anderen mikromechanischen Bauelementen mit anpassbarer Schwingungsfrequenz eingesetzt werden kann, beispielsweise bei Sensoren. Die Erfindung ist insbesondere vorteilhaft bei Anwendungen, bei denen das Schwingungssystem eines mikromechanischen Bauelements in seiner Resonanzfrequenz betrieben wird oder in der Nähe seiner Resonanzfrequenz, so dass die Erhöhung der Schwingungsamplitude durch den Resonanzeffekt ausgenutzt wird.

[0063] Die vorliegende Erfindung schafft somit ein Konzept zum Einstellen der Resonanzfrequenz eines Schwingungssystems aus Schwingungskörper und elastischer Aufhängung. Ein solches System kann als resonanter Oszillator bezeichnet werden, wobei mit zunehmender Federsteifigkeit des resonanten Oszillators aufgrund von großen Frequenzen und/oder großen Schwingkörperdimensionen sich der Kraftaufwand zum Ändern der Geometrie vergrößert. Die vorliegende Erfindung ermöglicht das Ändern der Resonanzfrequenz mit einer großen Auflösung, wobei die Federsteifigkeit sowohl bei Torsionsschwingern als auch bei translatorischen Schwingern modifiziert werden kann. Allgemein schafft die vorliegende Erfindung eine Integration von veränderlichen Federgeometrien mit vergrößerbaren, aber auch verkleinerbaren Federsteifigkeiten in resonanten Mikrosystemen, beispielsweise eindimensionalen Torsionsschwingern (z.B. eindimensionaler Mikroskopspiegel), zweidimensionalen Torsionsschwingern (beispielsweise zweidimensionalen Mikroskopspiegeln) und Translationsschwingern (beispielsweise resonanten Senkspiegeln). Die vorliegende Erfindung ist insbesondere vorteilhaft anwendbar, um Resonanzabweichungen solcher Bauelemente, beispielsweise durch Fertigungsschwankungen und um Resonanzschwankungen während des Betriebs der Bauelemente zu vermindern bzw. zu kompensieren. Die zum Ändern der Federgeometrie, bzw. der positiven oder negativen Abstandsänderung, notwendige Kraft kann vorzugsweise mit üblichen mikromechanischen Antriebprinzipien erzeugt werden, beispielsweise in einem elektrostatischen, einem elektrothermischen oder einem piezoelektrischen Antrieb. Die elastischen Aufhängungen können unter Verwendung veränderlicher Grundgeometrien sowie Kombinationen und Derivaten davon ausgeführt sein, beispielsweise parallel angeordneten Balkenfedern, V-förmig angeordneten Balkenfedern, Y-förmig angeordneten Balkenfedern und X-förmig angeordneten Balkenfedern. Variationen dieser Grundgeometrien können darin beste-

hen, einen beidseitig fest eingespannten zusätzlichen Mittelbalken vorzusehen, zwei oder mehr zusätzliche Mittelbalken vorzusehen, oder zwei oder mehr einseitig fest eingespannte Biegebalken vorzusehen. Ferner können zusätzliche Einrastelemente am beweglichen Ende der einseitig fest eingespannten Biegebalken mit und ohne eigenem mikromechanischem Antrieb vorgesehen sein, was ein reversibles und irreversibles (nur in eine Richtung) Einrasten ermöglichen kann.

Patentansprüche

1. Mikromechanisches Bauelement mit folgenden Merkmalen:

Einem Schwingungssystem, das einen Schwingungskörper (11) aufweist;
einer elastischen Aufhängung (12), mittels der der Schwingkörper (11) schwingfähig aufgehängt ist, wobei die elastische Aufhängung zumindest zwei Federbalken (12a, 12b) aufweist;
einer Einrichtung zum Einstellen einer Resonanzfrequenz des Schwingungssystems, die ausgelegt ist, um die Lage der zumindest zwei Federbalken (12a, 12b) der elastischen Aufhängung (12) zueinander zu verändern.

2. Mikromechanisches Bauelement gemäß Anspruch 1, bei dem die Änderung der Lage der zumindest zwei Federbalken (12a, 12b) eine Änderung eines Winkels, den die Federbalken einschließen, aufweist.

3. Mikromechanisches Bauelement gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem der Schwingungskörper (11) unter Verwendung der Federbalken (2a, 2b) an einem Trägerkörper (22) schwingfähig gelagert ist.

4. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem zumindest einer der Federbalken (2a, 2b) an dem Trägerkörper (22) beweglich gelagert ist, und bei dem die Einrichtung zum Einstellen der Resonanzfrequenz ausgelegt ist, um eine Position des trägerkörperseitigen Endes des zumindest einen Federbalkens (2a, 2b) zu ändern, um die Lage der Federbalken (12a, 12b) zueinander einzustellen.

5. Mikromechanisches Bauelement gemäß Anspruch 4, bei dem die zumindest zwei Federbalken (2a, 2b) an dem Trägerkörper (22) beweglich gelagert sind, wobei die Einrichtung zum Einstellen der Resonanzfrequenz ausgelegt ist, um die Position der trägerkörperseitigen Enden der Federbalken (12a, 12b) zu ändern.

6. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 4 oder 5, bei dem der Ort, an dem der oder die Federbalken an dem Trägerkörper (22) gelagert ist oder sind, um eine Richtung änder-

bar ist, die mit der Längsrichtung des Federbalkens einen Winkel zwischen 30 und 150 Grad bildet.

7. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem die elastische Aufhängung (12) parallel angeordnete Federbalken, V-förmig angeordnete Federbalken, Y-förmig angeordnete Federbalken und/oder X-förmig angeordnete Federbalken aufweist.

8. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem die elastische Aufhängung (12) einen oder mehrere beidseitig fest eingespannte Balken aufweist.

9. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, bei dem die elastische Aufhängung (12) Einrastelemente aufweist, in die ein Ende zumindest eines Federbalkens (12a, 12b), das an der Trägerstruktur beweglich gelagert ist, reversibel oder irreversibel einrastbar ist.

10. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem die Einrichtung zum Einstellen der Resonanzfrequenz eine mikromechanische Antriebseinrichtung zum Bewirken der Änderung der Lage der zumindest zwei Federbalken (12a, 12b) der elastischen Aufhängung (12) aufweist.

11. Mikromechanisches Bauelement gemäß Anspruch 10, bei dem die mikromechanische Antriebseinrichtung eine elektrostatische Antriebsvorrichtung, eine elektrothermische Antriebsvorrichtung, eine elektromagnetische Antriebsvorrichtung oder eine piezoelektrische Antriebsvorrichtung aufweist.

12. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, bei dem der Schwingungskörper als eindimensionaler Torsionsschwinger, zweidimensionaler Torsionsschwinger oder Translationschwinger ausgebildet ist.

13. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12, bei dem die Einrichtung zum Einstellen der Resonanzfrequenz ausgebildet ist, um die Lage der Federbalken (12a, 12b) zueinander in diskreten Schritten und/oder kontinuierlich einzustellen.

14. Mikromechanisches Bauelement gemäß einem der Ansprüche 1 bis 13, bei dem der Schwingungskörper ein Ablenkspiegel ist.

15. Lichtablenkvorrichtung mit folgenden Merkmalen:
einem mikromechanischen Bauelement gemäß Anspruch 14;
einer Antriebseinrichtung zum Betreiben des Schwingungssystems bei der Resonanzfrequenz.

16. Verfahren zum Betreiben eines mikromechanischen Bauelements mit einem Schwingungssystem, das einen Schwingungskörper (11) und eine elastische Aufhängung (12), mittels der der Schwingungskörper (11) schwingfähig aufgehängt ist, aufweist, wobei die elastische Aufhängung (12) zumindest zwei Federbalken (12a, 12b) aufweist, wobei das Verfahren folgenden Schritt umfasst:

Einstellen einer Resonanzfrequenz des Schwingungssystems durch eine Änderung der Lage der zumindest zwei Federbalken (12a, 12b) der elastischen Aufhängung (12) zueinander.

17. Verfahren zum Betreiben eines mikromechanischen Bauelements gemäß Anspruch 16, bei dem zur Einstellung der Resonanzfrequenz die Federsteifigkeit der elastischen Aufhängung (12) entweder in diskreten Schritten oder kontinuierlich eingestellt wird.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 und 17, das ferner einen Schritt eines Bestimmens einer Resonanzfrequenz des Schwingungssystems und einen Schritt des Änderns der Lage der zumindest zwei Federbalken, um die Resonanzfrequenz in Richtung einer Sollresonanzfrequenz zu verschieben, aufweist.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

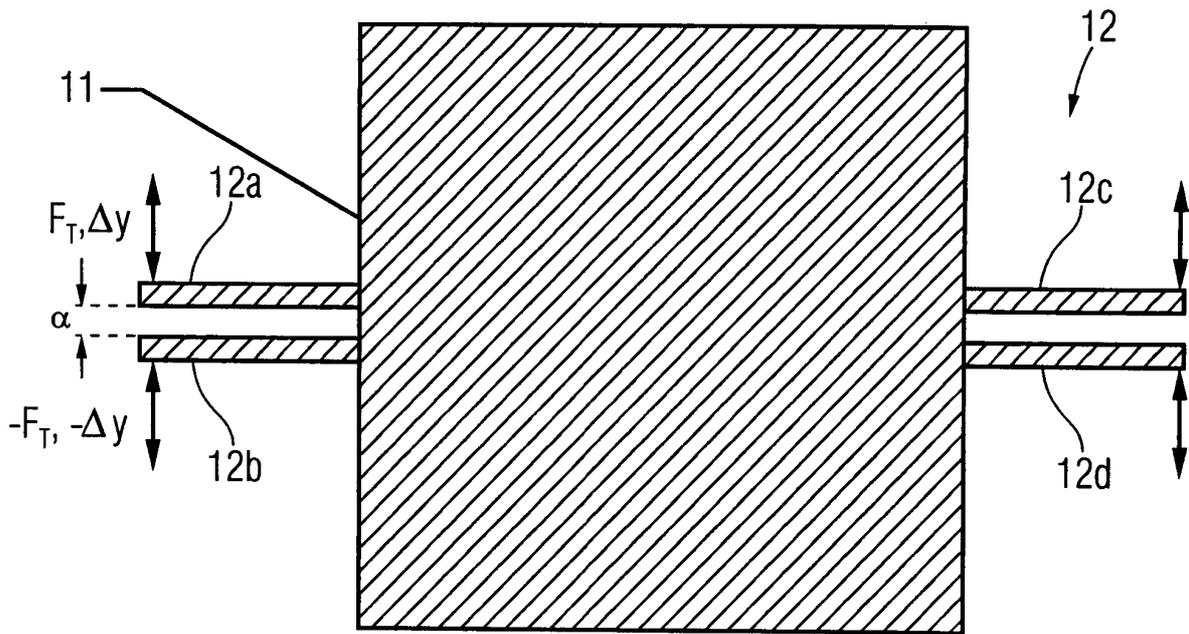


FIG. 1

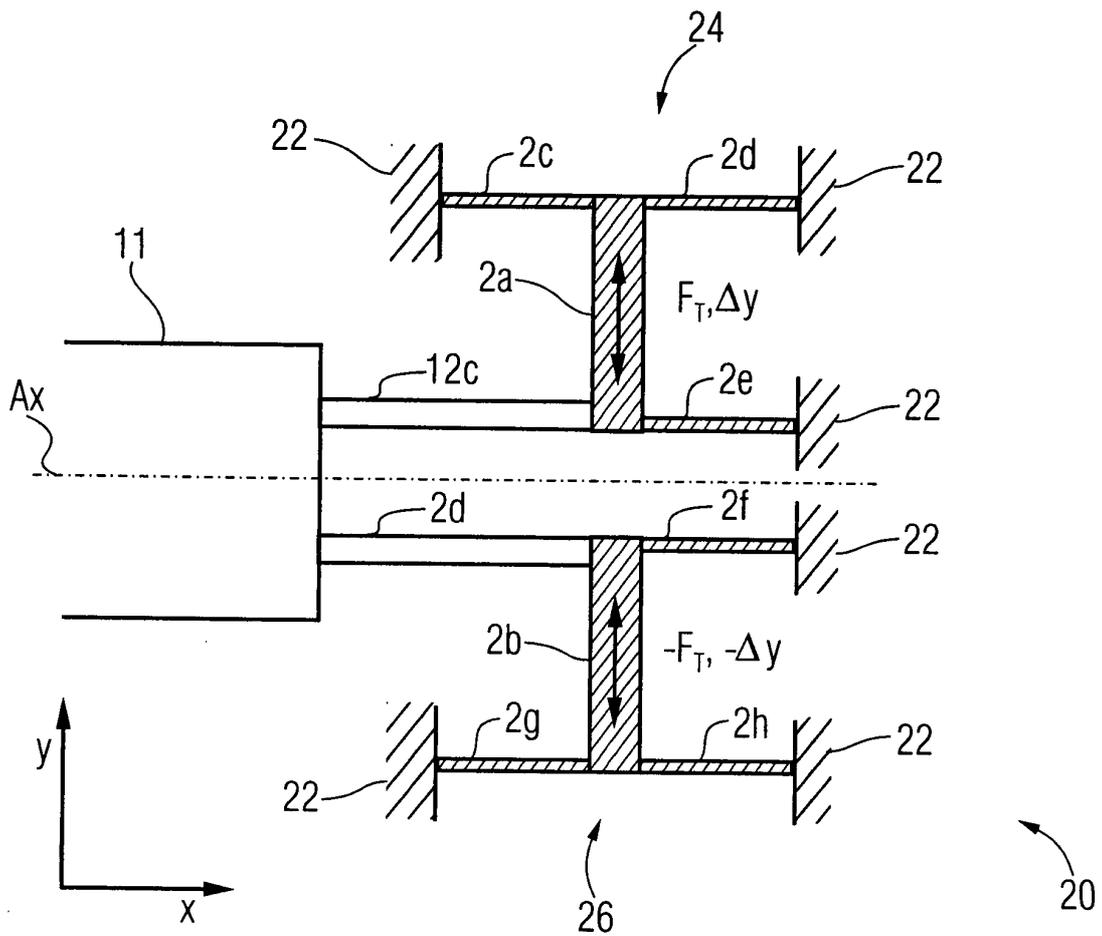


FIG. 2

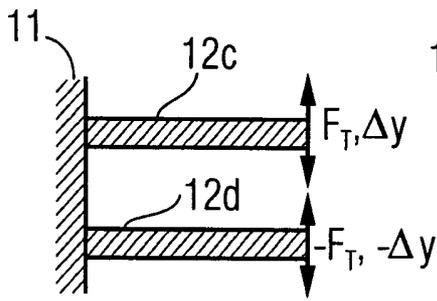


FIG. 3a

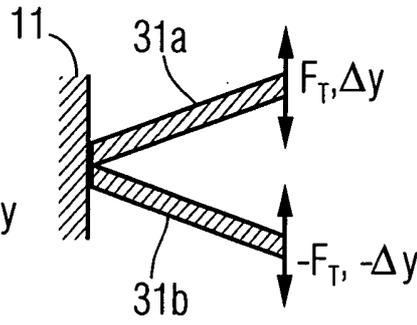


FIG. 3b

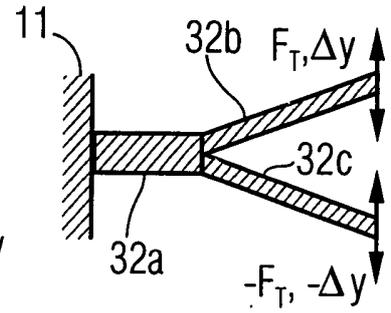


FIG. 3c

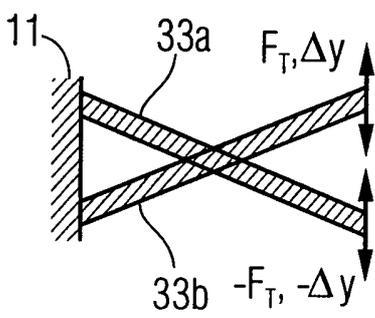


FIG. 3d

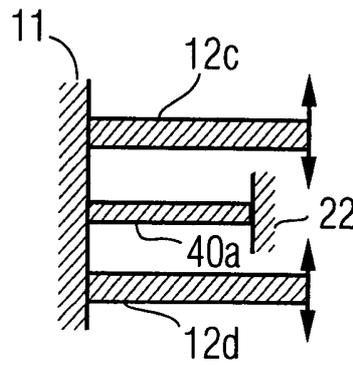


FIG. 4a

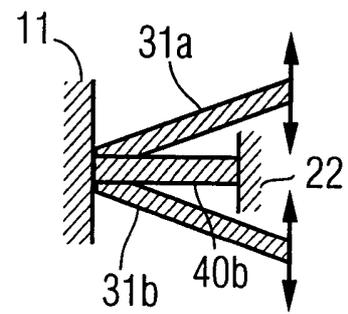


FIG. 4b

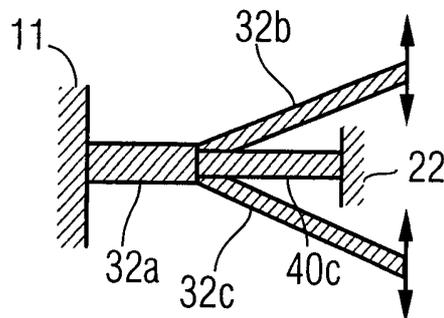


FIG. 4c

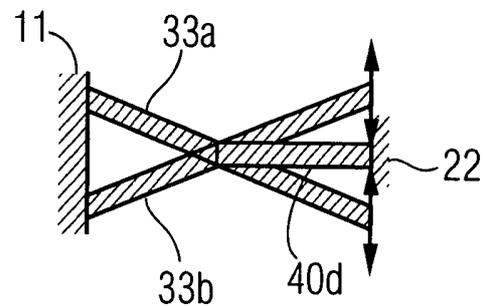
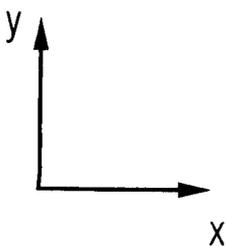


FIG. 4d



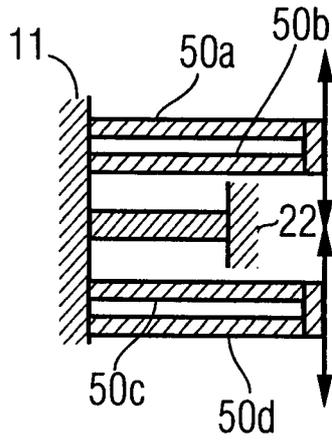


FIG. 5a

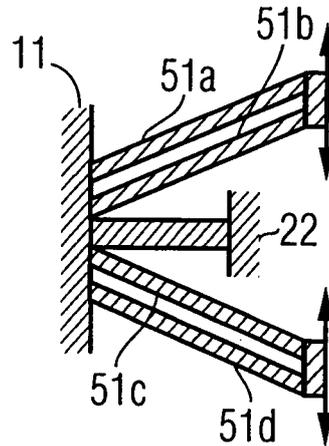


FIG. 5b

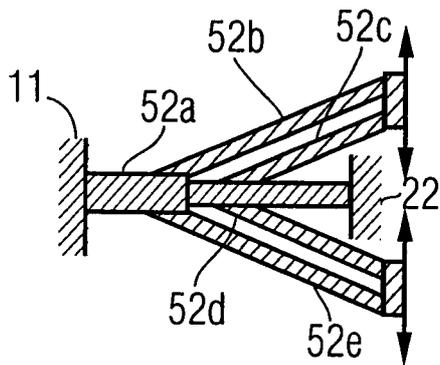


FIG. 5c

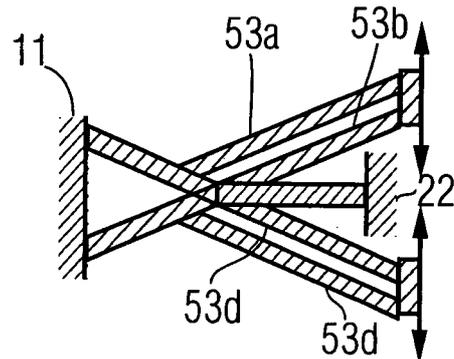


FIG. 5d

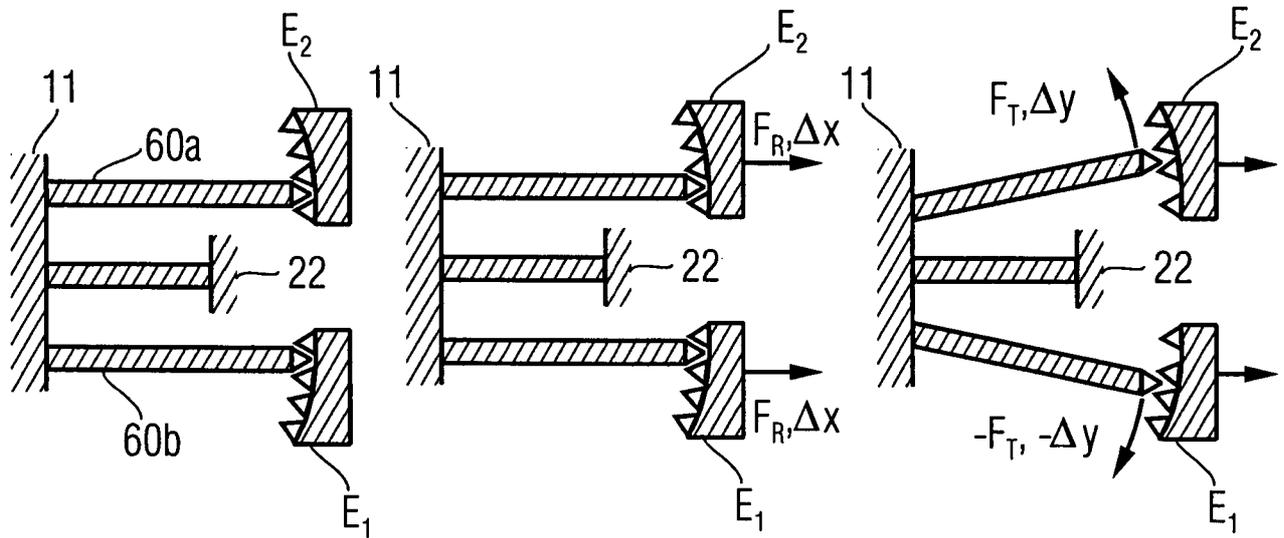


FIG. 6

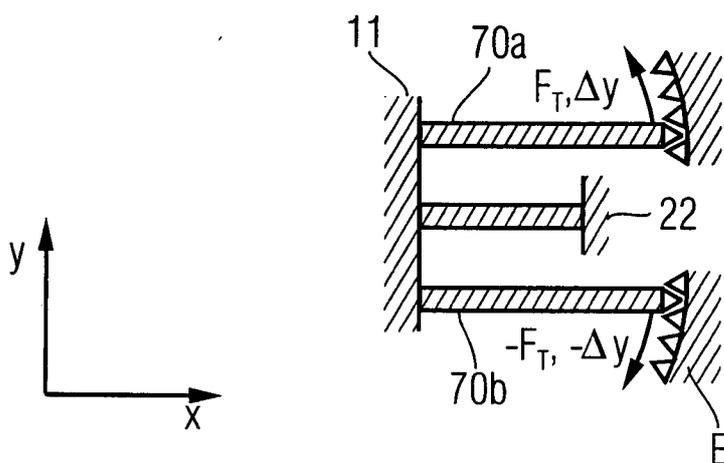


FIG. 7