

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
3. Juni 2010 (03.06.2010)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2010/060552 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
H02N 1/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/008160

(22) Internationales Anmeldedatum:  
17. November 2009 (17.11.2009)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2008 059 634.5  
28. November 2008 (28.11.2008) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme  
von US): **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR  
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FOR-  
SCHUNG E.V.** [DE/DE]; Hansastr. 27c, 80686 München  
(DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **HOFMANN, Ulrich**  
[DE/DE]; Edendorferstr. 177k, 25524 Itzehoe (DE).  
**OLDSEN, Martin** [DE/DE]; Bahrenfelder Kirchenweg  
67, 22761 Hamburg (DE). **WAGNER, Bernd** [DE/DE];  
Hohe Str. 11, 25582 Looft (DE).

(74) Anwalt: **GAGEL, Roland**; Landsberger Str. 480a,  
D-81241 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,  
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY,  
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,  
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,  
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN,  
KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA,  
MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG,  
NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC,  
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR,  
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,  
GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,  
ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,  
TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,  
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT,  
LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI,  
SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,  
GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu  
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz  
2 Buchstabe g)

(54) Title: AN ELECTROSTATIC COMB-DRIVE MICROMECHANICAL ACTUATOR

(54) Bezeichnung : MIKROMECHANISCHER AKTUATOR MIT ELEKTROSTATISCHEM KAMM-ANTRIEB

(57) Abstract: The invention relates to a micromechanical actuator, especially a micro-mirror scanner, comprising an actuator unit (1-3) in an outer frame (5) which unit is suspended in the outer frame (5) via two torsion elements (4), and electrostatic tilt drives (14, 15) from intermeshing first and second comb-type electrodes (16, 17) which are off-set from each other vertically. The first electrodes (17) are rigidly connected to the outer frame (5) and the second electrodes (16) to the outer frame via an outer connecting element (18) and to the actuator unit (1-3) via an inner connecting element (12, 13). The inner connecting element (12, 13) has a spring which extends in parallel to the outer tilting axis, which is connected to the same in a section of the actuator unit close the outer tilting axis, and which is designed and arranged to be rigid in the vertical direction and flexible at a right angle to the vertical direction. The micromechanical actuator according to the invention allows the use in a micro-mirror scanner whose slow axis is non-resonantly driven with excursions of  $> \pm 7^\circ$ , lateral mirror sizes having dimensions of 1 mm and more and a resonant frequency of  $> 1$  kHz and can be integrated even into flat mobile phones.

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft einen mikromechanischen Aktuator, insbesondere einen Mikrospiegelscanner, mit einer Aktuatereinheit (1-3) in einem äußeren Rahmen (5), die über zwei Torsionselemente (4) in dem äußeren Rahmen (5) aufgehängt ist, und elektrostatischen Kippantrieben (14, 15) aus ineinander greifenden ersten und zweiten kammförmigen Elektroden (16, 17), die einen gegenseitigen Höhenversatz aufweisen. Die ersten Elektroden (17) sind starr mit dem äußeren Rahmen (5) und die zweiten Elektroden (16) jeweils über ein äußeres Verbindungselement (18) mit dem äußeren Rahmen (5) und über ein inneres Verbindungselement (12, 13) mit der Aktuatereinheit (1-3) verbunden. Das innere Verbindungselement (12, 13) weist eine Feder auf, die sich parallel zur äußeren Kippachse erstreckt, jeweils in einem Bereich der Aktuatereinheit mit dieser verbunden ist, der nahe an der äußeren Kippachse liegt, und so ausgebildet und angeordnet ist, dass sie in der vertikalen Richtung starr und quer zur vertikalen Richtung biegsam ist. Der vorgeschlagene mikromechanische Aktuator ermöglicht einen Einsatz in einem Mikrospiegelscanner bei nichtresonantem Antrieb der langsamen Achse mit Auslenkungen von  $> \pm 7^\circ$ , lateralen Spiegelgrößen mit Dimensionen von 1 mm und darüber und einer Resonanzfrequenz von  $> 1$  kHz und lässt sich auch in flache Mobiltelefone integrieren.



WO 2010/060552 A2

Mikromechanischer Aktuator mit elektrostatischem Kamm-  
Antrieb

**Technisches Anwendungsgebiet**

Die vorliegende Erfindung betrifft einen mikro-  
5 mechanischen Aktuator, insbesondere einen Mikrospiegel-  
scanner, mit einer Aktuatoreinheit in einem äußeren  
Rahmen, die über zwei sich entlang einer äußeren  
Kippachse der Aktuatoreinheit erstreckende Torsions-  
elemente in dem äußeren Rahmen aufgehängt ist, und  
10 einem elektrostatischen Kippantrieb aus ineinander  
greifenden ersten und zweiten kammförmigen Elektroden,  
von denen die ersten Elektroden starr mit dem äußeren  
Rahmen und die zweiten Elektroden jeweils mit der  
Aktuatoreinheit verbunden sind.

15

Zum Antreiben mikromechanischer Siliziumaktuatoren  
(MEMS-Aktuatoren) werden bereits seit mehreren Jahr-  
zehnten erfolgreich elektrostatische Kräfte eingesetzt.  
Diese besitzen gegenüber elektromagnetischen, piezo-  
20 elektrischen und thermischen Antriebsprinzipien den  
Vorteil, dass die gesamte Mikroaktor-Struktur samt  
ihrer Antriebe vollständig aus Silizium realisiert  
werden kann. Beispiele für derartige mikromechanische  
Aktuatoren sind resonant betriebene Mikrospiegel,  
25 Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Da keine  
weiteren, in der Regel hinsichtlich ihres thermischen  
Ausdehnungskoeffizienten fehlangepassten Materialien  
verwendet werden, lassen sich diese mikromechanischen  
Aktuatoren mit den gängigen Wafer-Verbindungstechniken,  
30 wie anodisches Bonden, eutektisches Bonden oder

- 2 -

Glasfrit-Bonden trotz der damit einhergehenden hohen Temperaturen von zum Teil deutlich über 300° C vergleichsweise leicht und mit hoher Ausbeute auf Wafer-Ebene verkapseln (Wafer-Level-Packaging). Eine  
5 geeignete Kapselung ist für MEMS-Produkte unerlässlich, um Schutz gegenüber Kontamination mit Partikeln, Flüssigkeiten und Gasen, aber auch gegenüber mechanischer Überbeanspruchung zu bieten. Durch die Möglichkeit der Verkapselung dieser Systeme nicht erst  
10 auf Chip-Ebene sondern bereits auf Wafer-Ebene werden niedrige Herstellungskosten bei zugleich hohen Fertigungsausbeuten erzielt.

Diese Vorteile lassen sich mit den anderen  
15 Antriebsprinzipien nicht erreichen. So erfordern bspw. elektrodynamische Antriebe das Aufbringen dicker Metallschichten, um daraus Planarspulen mit möglichst geringem Ohmschen Widerstand zu realisieren. Neben dem bereits erheblichen Nachteil der bei der Metall-  
20 Abscheidung kaum zu vermeidenden Schichtspannungen bzw. Schichtspannungs-Gradienten, welcher starke Verbiegungen des Aktuators zur Folge haben kann, sowie der hohen metallischen Masse, die der Aktuator mit sich tragen muss, ergibt sich ein noch größeres Problem im  
25 Zusammenhang mit dem Versuch, einen solchen Aktuator mit Wafer-Bond-Techniken auf Wafer-Ebene zu verkapseln. In den meisten Fällen schließt die thermische Fehlanpassung der beteiligten Materialien ein Wafer-Level-Packaging-Verfahren wegen der hohen Temperaturen aus.  
30 In der Regel bleiben dann nur nicht-hermetische Klebeverbindungsstechniken zum Schutz der Mikrostruktur übrig. Weitere erhebliche Nachteile der elektromagnetischen Antriebe ergeben sich aus der Notwendig-

- 3 -

keit, neben bewegten Planarspulen auch noch ein äußeres Magnetfeld durch möglichst dicht am Mikroaktuator platzierte, hybrid aufgebrachte Permanentmagnete zu erzeugen. Ein solches hybrid montiertes System ist  
5 teurer und weniger gut für Massenfertigung geeignet als ein elektrostatischer Aktuator. Das erzielbare Minimalvolumen eines elektromagnetisch angetriebenen MEMS-Aktuators liegt in der Regel deutlich über jenem, welches sich für einen mit elektrostatischen Antrieben  
10 ausgestatteten Aktuator erzielen lässt.

Der vorgeschlagene mikromechanische Aktuator ist besonders für den Bereich der optischen Mikrospiegel-Aktuatoren von Bedeutung, kann aber ebenso auch für  
15 viele andere Aktuatoren-Typen wie Schalter oder Gyroskope zum Einsatz kommen. Mikrospiegel werden für das gezielte Ablenken eines einfallenden Lichtstrahls oder elektromagnetischer Strahlung anderer Wellenlängenbereiche (IR, UV) eingesetzt. In der Regel  
20 handelt es sich hierbei um aus Silizium heraus geätzte dünne Platten, die entweder dielektrisch oder mit sehr dünnen metallischen Schichten verspiegelt werden und beweglich an Torsions- oder Biegebändchen aufgehängt sind. Resonant betrieben lassen sich solche bis zu  
25 mehreren Millimeter großen Mikrospiegel bei Frequenzen von vielen Kilohertz mit ausreichend großen Scan-Amplituden auslenken. In den letzten Jahren wurde sehr intensiv an der Entwicklung von zweiachsigen scannenden Mikrospiegel-Systemen gearbeitet, welche in kompakten  
30 Laser-Projektions-Displays zum Einsatz kommen sollen. Ein ein- oder mehrfarbiger Laserstrahl wird auf den beweglichen Spiegel gerichtet und durch diesen in zwei Achsen, vertikal und horizontal, so schnell abgelenkt,

- 4 -

dass auf der Projektionsfläche für das menschliche Auge eine geschlossen ausgeleuchtete rechteckige Fläche wahrnehmbar wird. Durch Synchronisation der modulierten Laserquelle mit der Spiegelbewegung kann dann Bild-  
5 information mit hoher Auflösung übertragen werden.

Für die Ablenkung des Laserstrahls über die Projektionsfläche sind zwei grundsätzlich verschiedene Scan-Verfahren bekannt, der Raster-Scan sowie der  
10 Lissajous-Scan. Bei dem bevorzugt eingesetzten Raster-Scan wird in der Regel eine schnelle Zeilenbewegung mit einer langsamen Vertikalbewegung kombiniert. Um bspw. ein Bild in SVGA-Auflösung, also mit 600 Zeilen á 800 Bildpunkten bei einer Bildwiederholrate von 60 Hz zu  
15 projizieren, wird eine Zeilenfrequenz von mindestens 36 kHz benötigt. Dies gilt für Zeilenprojektionen einer Schreibrichtung, also z. B. von links nach rechts. Während der Rückstellzeit des Zeilen- bzw. Horizontal-Scanners wird also keine Information übertragen. Möchte  
20 man jedoch beide Scanrichtungen ausnutzen, Zeilen also sowohl von links nach rechts als auch von rechts nach links projizieren, dann halbiert sich die Frequenzanforderung auf mindestens 18 kHz. Um bei dieser nach wie vor sehr hohen Scanfrequenz auch noch ausreichend  
25 große Scan-Amplituden erzielen zu können, werden die Horizontal-Scanner üblicherweise in Resonanz betrieben, was einen sinusförmigen Geschwindigkeitsverlauf und damit eine unerwünschte inhomogene Verteilung der Lichtintensität in Zeilenrichtung zur Folge hat.  
30 Während dies in Bezug auf die horizontale Achse nahezu nicht zu umgehen ist, soll eine optimale Homogenität der Bilddarstellung wenigstens in vertikaler Richtung erreicht werden. Dies wird idealerweise durch einen

- 5 -

nichtresonanten Betrieb für die Auslenkung in vertikaler Richtung mit sägezahnförmigem Scanverlauf erzielt. Um das zur Verfügung stehende Licht optimal zu nutzen, wird dabei angestrebt, den schnellen Rücklauf zum Startpunkt - also die steil abfallende Sägezahn-Flanke des Vertikalscans - so kurz wie möglich zu gestalten. Für kompakte Laser-Projektions-Displays mit Auflösungen im VGA-Format, SVGA-Format oder größer ist aus optischen Randbedingungen heraus eine Spiegelplatte mit einem Durchmesser im Millimeterbereich erforderlich. Das Produkt aus Spiegeldurchmesser und einseitigem mechanischen Scanwinkel ergibt das sog. Theta-D-Produkt, welches als Maß für die optische Auflösung angesehen werden kann. So ist bspw. für eine SVGA-Auflösung in horizontaler Richtung ein Theta-D-Produkt [mm x Grad] von 9,37 und in vertikaler Richtung von 7,03 erforderlich. Um einerseits eine ausreichende Schock-Robustheit und Vibrations-Unempfindlichkeit des Mikrosystems im mobilen Einsatz, bspw. in einem Mobiltelefon, und andererseits ein ausreichend schnelles Rückstellen des Spiegels im Sägezahnbetrieb von vorzugsweise unterhalb von 2 ms zu erreichen, sollte die unterste Eigenresonanz der langsamen Achse (vertikale Auslenkung) 1000 Hz nicht unterschreiten.

25

Sei beispielhaft ein sehr kompakter zweiachsiger, kardanisch aufgehängter Mikrospiegel-Scanner angenommen, dessen Spiegel-Platte eine Kantenlänge von 1 mm besitzt. Der diesen Spiegel und dessen Torsionsfeder umgebende, ebenfalls beweglich aufgehängte Rahmen (im Englischen meist als Gimbal bezeichnet) besitzt zwangsläufig eine deutlich größere Kantenlänge als der Spiegel. Nehmen wir eine vergleichsweise kurze Feder-

30

- 6 -

länge der Torsionsfedern von 300  $\mu\text{m}$  und eine zusätzliche Rahmenbreite von 200  $\mu\text{m}$  an. Bei quadratischer Kontur besitzt der bewegliche Rahmen dann eine Kantenlänge L von 2 mm. Für den Mikroaktuator nehmen wir  
5 ferner eine minimale Dicke D von 60  $\mu\text{m}$  und eine Mindest-Torsions-Eigenfrequenz von 1000 Hz an. Zum Erreichen von SVGA-Auflösung wird eine mechanische Verkipfung  $\theta$  des beweglichen Rahmens von mindestens +/- 7° benötigt:

10

Für die Torsions-Eigenfrequenz  $F_{\text{res}}$  gilt:

$$F_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (1)$$

15 worin k die Federkonstante und J das Massenträgheitsmoment des Spiegels um die Drehachse darstellen.

Für J gilt:

20

$$J = \frac{1}{12} \rho D L^4 \quad (2)$$

Darin ist  $\rho$  die Dichte des Spiegelmaterials (Dichte Silizium: 2330 kg/m<sup>3</sup>).

25

Für das mechanische Rückstell-Drehmoment  $T_{\text{mech}}$  bei gefordertem Vollausschlag von hier angenommenen +/- 7° gilt:

30

$$T_{\text{mech}} = k\theta \quad (3)$$

- 7 -

Außerdem gilt für den Maximalausschlag:

$$|T_{\text{aktuator}}| = |T_{\text{mech}}| \quad (4)$$

5 Wird in Gleichung (3) die Federkonstante  $k$  durch Ausdruck (1) ersetzt und werden die gegebenen Werte für Frequenz, Dichte, Kantenlänge und Spiegeldicke eingesetzt, so kann unter Berücksichtigung von Gleichung (4) das erforderliche vom Aktuator aufzubringende Dreh-  
10 moment  $T_{\text{aktuator}}$  ermittelt werden:

$$T_{\text{aktuator}} = \frac{4\pi^2 f_{\text{res}}^2 \rho D L^4 \theta}{12} = \frac{4\pi^2 (1000 \text{ Hz})^2 \cdot 2330 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 60 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot (0,002 \text{ m})^4 \cdot \frac{7\pi}{180}}{12} = 8,99 \cdot 10^{-7} \text{ Nm}$$

Zur Erzeugung von Drehmomenten dieser Größen-  
15 ordnung sind zwar Mikroaktuatoren mit elektromagnetischen Antrieben bekannt. Diese haben jedoch die weiter oben angeführten Nachteile. Bekannte mikro-mechanische Aktuatoren mit nichtresonanten elektrostatischen Antrieben sind bisher nicht in der Lage,  
20 derartige Drehmomente bei der geforderten Größe der Mikrospiegel und hohen Auslenkung zu erreichen.

### Stand der Technik

25 Für die Verkippung einer Aktuatoreinheit sind elektrostatische Kippantriebe bekannt, die ineinander greifende bewegliche und statische kamm- oder fingerförmige Elektroden aufweisen. Um mit Hilfe von derartigen elektrostatischen Antrieben, auch als  
30 Kammantriebe bezeichnet, quasistatische Auslenkungen nennenswerter Amplitude zu erzeugen, kommen bislang nur

- 8 -

Kammelektroden mit gegenseitigem vertikalen Höhenversatz in Betracht. In den meisten Fällen wird der Höhenversatz durch Verwendung einer zweiten Siliziumschicht erzeugt, welche gegenüber der darunter  
5 liegenden ersten Elektrodenebene elektrisch isoliert ist. Statische und bewegliche Elektroden werden in verschiedenen Ebenen erzeugt und besitzen dadurch den gewünschten Höhenunterschied. Durch Anlegen einer Spannung zwischen den statischen und beweglichen  
10 Elektroden wird die bewegliche Elektrode aus der Ebene heraus ausgelenkt bis elektrostatisches Drehmoment und mechanisches Rückstellmoment der Federaufhängung des Spiegels oder Rahmens einander ausgleichen. Der maximal erreichbare statische Auslenkwinkel ist einerseits  
15 durch den durch den Fertigungsprozess bedingten Höhenunterschied der Elektrodenebenen und andererseits durch die Elektrodengeometrie, nämlich den lateralen Abstand des beweglichen Elektrodenkamm-Endes von der Drehachse der Aktuatoreinheit, gegeben. Je größer  
20 dieser Abstand ist, desto kleiner ist der maximal erzielbare Auslenkwinkel. Je größer der Höhenunterschied der Elektrodenebenen ist, desto größer ist dieser Auslenkwinkel.

25 Um große Kippwinkel von größer  $\pm 5^\circ$  mechanisch auch quasistatisch, d.h. im nichtresonanten Betrieb, erreichen zu können, ist es erforderlich, die Elektroden nahe der Dreh- bzw. Kippachse anzubringen und keine zu langen Elektrodenfinger zu realisieren.  
30 Nur auf diese Weise lässt sich über einen größeren Winkelbereich ein wirksames Drehmoment erzeugen. Aufgrund des kurzen Hebelarmes ist das erzielbare Drehmoment allerdings auch sehr viel niedriger als bei

- 9 -

einer vergleichbaren achsenfernen Elektroden-Anordnung mit großem Hebelarm.

So zeigen bspw. Young-Chul Ko et al., „Gimbaled 2D  
5 Scanning Mirror with vertical combs for Laser Display“,  
IEEE Optical MEMS and Their Applications Conference,  
2006, Seiten 104 und 105, einen derartigen zweiachsigen  
Mikrospiegelscanner für Laserdisplays mit höhen-  
versetzten Kammelektroden, über die die langsame Achse  
10 dieser so genannten Gimbal-Anordnung nichtresonant  
angetrieben wird. Die beweglichen Kammelektroden sind  
hierbei fest mit der Aktuatoreinheit verbunden und  
erstrecken sich vom Verbindungspunkt mit der  
Aktuatoreinheit parallel zur äußeren Kippachse, d.h.  
15 zur langsamen Achse. Während Spiegeldurchmesser und  
Resonanzfrequenz bei diesem Mikrospiegelscanner die  
obigen Anforderungen erfüllen, erreicht der erzielte  
mechanische quasistatische Kippwinkel von  $\pm 4,2^\circ$   
nicht die Vorgaben für hoch aufgelöste Projektion.

20

Dies ist nur ein Beispiel von vielen, die zeigen,  
dass eine Standardkonstruktion eines zweiachsigen  
Mikrospiegelscanners mit achsennah angebrachten  
Elektroden bisher nicht geeignet ist, die großen  
25 erforderlichen Scanwinkel der langsamen quasistatischen  
Achse von größer  $\pm 7^\circ$  zu erreichen, wenn der Spiegel  
gleichzeitig einen Mindestdurchmesser von 1 mm nicht  
unterschreiten und die Resonanzfrequenz der langsamen  
Achse nicht nennenswert unterhalb von 1 kHz liegen  
30 soll. Die erforderlichen hohen Kräfte wären nur in  
Verbindung mit einer weitaus größeren Anzahl an  
achsennah angebrachten Kammelektrodenfingern möglich.  
Damit entstünden jedoch neue Probleme, denn die bewegte

- 10 -

Masse steigt dadurch deutlich an, die Empfindlichkeit gegenüber Beschleunigungen nimmt zu und der Platzbedarf ist dann nicht nur entlang der schnellen Spiegelachse sondern auch noch senkrecht dazu sehr groß. Gerade für  
5 einen Einsatz eines derartigen zweiachsigen Scanners in Mobiltelefonen zukünftiger Generationen, die erneut flacher werden dürften als die bestehenden, muss zumindest eine der beiden Chipkantenlängen, die parallel zur Spiegelfläche liegen, ausreichend klein  
10 ausfallen, um den Spiegelchip noch integrieren zu können.

Aus V. Milanović, „Improved Control of the Vertical Axis Scan for MEMS Projection Displays“,  
15 Optical MEMS and Nanophotonics, 2007, Seiten 89 und 90, ist eine Anordnung bekannt, die trotz elektrostatischer Kammantriebe vergleichsweise große quasistatische Kippwinkel bei ausreichend hoher Resonanzfrequenz und Spiegelgröße erreichen kann. Dort wird ein zweiachsiger  
20 Spiegel für Laserprojektion beschrieben, der allerdings in anderer Weise als die oben beschriebenen Mikrospiegel-Scanner arbeitet. Der Spiegel besitzt zur Realisierung der beiden Achsen keine Gimbal-Anordnung, bei der die beiden Achsen nahezu vollständig unabhängig  
25 voneinander ausgelenkt werden können. Es wird vielmehr eine nachträglich aufgeklebte Spiegelplatte mit Hilfe einer kleinen in zwei Achsen kippbaren Plattform ausgelenkt. Die Achsen sind dabei prinzipbedingt stärker miteinander gekoppelt als bei einer Gimbal-  
30 Anordnung. Dies ist für die vorliegend angestrebten Anwendungen jedoch unerwünscht, da eine genaue Führung über die Kippachsen fehlt. Die Plattform wird über Kammantriebe verkippt, die sich weit vom Spiegel bzw.

- 11 -

der Plattform entfernt befinden. Die Drehmomente werden über lange, zur Chipmitte hin orientierte und mit mehreren Gelenken versehene Stangen an die Plattform übertragen. Aufgrund dieses Aufbaus sind beide

5 Chipkantenlängen nahezu gleich groß und somit für einen Einbau in flache Geräte, insbesondere flache Mobiltelefone, ungeeignet. Der vorgeschlagene Scanner erreicht bei einem Spiegelplattendurchmesser von 0,8 mm und einer akzeptablen Resonanzfrequenz von 934 Hz den

10 Messdaten zu Folge eine mechanische Vertikal-Gesamtablenkung von ca.  $11^\circ$ , d. h. eine symmetrische Auslenkung von  $\pm 5,5^\circ$ . Dies erfüllt ebenfalls noch nicht die obigen Anforderungen an ein hochauflösendes Laserdisplay.

15

Ausgehend von diesem Stand der Technik besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, einen mikromechanischen Aktuator mit einem nichtresonanten elektrostatischen Kamm-Antrieb anzugeben, der geeignet

20 ist, einen Mikrospiegel mit einer Kantenlänge von mindestens einem Millimeter bei einer Eigenresonanz von  $\geq 1$  kHz um mindestens  $\pm 7^\circ$  auszulenken. Der Aktuator soll auch in einer zweiachsigen Ausgestaltung für den nichtresonanten Antrieb der langsamen Achse geeignet

25 sein und eine einfache und preisgünstige Herstellung in Siliziumtechnologie, eine hermetische Vakuumverpackung sowie eine niedrige Leistungsaufnahme ermöglichen.

30

### **Darstellung der Erfindung**

Die Aufgabe wird mit dem mikromechanischen Aktuator gemäß Patentanspruch 1 gelöst. Vorteilhafte

- 12 -

Ausgestaltungen des Aktuators sind Gegenstand der abhängigen Patentansprüche oder lassen sich der nachfolgenden Beschreibung sowie den Ausführungsbeispielen entnehmen.

5

Der vorgeschlagene mikromechanische Aktuator weist eine Aktuatoreinheit in einem äußeren Rahmen, die über zwei sich entlang einer äußeren Kippachse der Aktuatoreinheit erstreckende Torsionselemente in dem äußeren  
10 Rahmen aufgehängt ist, und elektrostatische Kippantriebe aus ineinander greifenden ersten und zweiten kamm- oder fingerförmigen Elektroden auf, die einen gegenseitigen Höhenversatz aufweisen. Die ersten Elektroden sind jeweils starr mit dem äußeren Rahmen  
15 und die zweiten Elektroden jeweils über ein äußeres Verbindungselement mit dem äußeren Rahmen und über ein inneres Verbindungselement mit der Aktuatoreinheit verbunden. Bei dem vorgeschlagenen Aktuator ist das äußere Verbindungselement so ausgebildet, dass es in  
20 einer vertikalen Richtung zu der durch den äußeren Rahmen aufgespannten Ebene eine Verbiegung ermöglicht. Das innere Verbindungselement weist eine Feder auf, die sich parallel zur äußeren Kippachse erstreckt, jeweils in einem Bereich der Aktuatoreinheit mit dieser  
25 verbunden ist, der näher an der äußeren Kippachse als an einem der äußeren Kippachse gegenüberliegenden Rand der Aktuatoreinheit liegt, und so ausgebildet und angeordnet ist, dass sie in der vertikalen Richtung starr und quer zur vertikalen Richtung biegsam ist. Die  
30 Feder ist so ausgebildet, dass sie sowohl laterale Biegung als auch Torsion ermöglicht, um damit den gegenläufigen Kreisbogen-Bewegungen von Aktuatoreinheit und elektrostatischem Kippantrieb möglichst geringen

- 13 -

Widerstand entgegen zu setzen, jedoch hohen Widerstand gegenüber vertikaler Durchbiegung erzeugt.

Vorzugsweise hat die Feder einen rechteckigen Querschnitt mit hohem Aspektverhältnis, d.h. die Form und Eigenschaften einer Blattfeder. Beispielsweise könnte diese Blattfeder im Querschnitt eine Breite von  $\leq 5 \mu\text{m}$  und eine Höhe von  $\geq 30 \mu\text{m}$  aufweisen. Es sind aber auch andere Geometrien und Querschnitte der Feder möglich, um die oben beschriebenen Eigenschaften zu erzielen.

Die Aktuatoreinheit kann bspw. alleine durch einen Mikrospiegel gebildet sein, so dass ein einachsiger Mikrospiegelscanner erhalten wird. Die Aktuatoreinheit kann auch selbst wiederum einen Rahmen umfassen, in dem ein Aktuatorelement, bspw. ein Mikrospiegel, um eine weitere Kippachse drehbar gelagert ist, wie dies in einer Ausgestaltung des vorgeschlagenen mikro-mechanischen Aktuators realisiert ist. Hierdurch wird ein zweiachsiger Mikrospiegelscanner erhalten, der die obigen Anforderungen an die vertikale Auslenkbarkeit, die Resonanzfrequenz sowie den nicht resonanten Antrieb der langsamen Achse bei lateralen Spiegeldimensionen von 1 mm oder größer ermöglicht.

Dies wird vor allem durch die besondere Ausgestaltung des elektrostatischen Kipp- bzw. Kammantriebes für die Aktuatoreinheit mit den Verbindungselementen zur Aktuatoreinheit und zum äußeren Rahmen erreicht. Ein wesentliches Merkmal stellt hierbei die Feder und deren Anordnung am inneren Verbindungselement dar, durch deren Einfluss die hohen Drehmomente bei

- 14 -

entsprechend hoher Auslenkung auf die Aktuatoreinheit übertragen werden können. Dies erfordert eine vertikal starre, jedoch in sich lateral verbiegbare Feder, die nahe der äußeren Kippachse mit der Aktuatoreinheit  
5 verbunden ist. Hierbei werden insgesamt vier Federn eingesetzt, zwei für jede Seite der Aktuatoreinheit bzgl. der Kippachse, die sich dann an der Aktuator-  
einheit symmetrisch gegenüber liegen. Die elektro-  
statischen Kippantriebe können hierbei auch aus  
10 mehreren Gruppen von kamm- oder fingerförmigen Elektroden bestehen. Die ersten und zweiten Elektroden weisen jeweils einen gegenseitigen Höhenversatz auf, um eine stabile Auslenkung der Aktuatoreinheit in beiden Richtungen erreichen zu können.

15

Die Aktuatoreinheit oder das Aktuatorelement sind nicht auf Mikrospiegel beschränkt. Vielmehr lassen sich auch viele andere Arten von Aktuatoren, wie bspw. Schalter, Sensoren oder Gyroskope mit diesem Aufbau  
20 realisieren.

In einer bevorzugten Ausgestaltung wird der vorgeschlagene Aktuator als zweiachsiger Aktuator, insbesondere als zweiachsiger Mikrospiegelscanner,  
25 ausgebildet. Hierzu weist die Aktuatoreinheit ein Aktuatorelement in einem inneren Rahmen sowie weitere elektrostatische Kippantriebe aus ineinander greifenden dritten und vierten kamm- oder fingerförmigen Elektroden auf. Das Aktuatorelement ist wiederum über  
30 Torsionselemente, die sich entlang einer inneren Kippachse senkrecht zur äußeren Kippachse erstrecken, in den inneren Rahmen aufgehängt. Die Begriffe der inneren und äußeren Kippachse dienen hier nur zur

- 15 -

Unterscheidung der beiden Kippachsen, wobei die innere Kippachse die Kippachse des im Aktuator weiter innen liegenden Elementes bezeichnet. Der innere Rahmen entspricht dabei dem beweglichen Rahmen dieser Gimbal-  
5 Anordnung. Die dritten Elektroden sind starr mit dem inneren Rahmen und die vierten Elektroden starr oder biegsam mit dem Aktuatorelement verbunden, um eine Verkipfung des Aktuatorelementes über den Kippantrieb um die innere Kippachse antreiben zu können. Auch hier  
10 sind die dritten und vierten Elektroden vorzugsweise gegeneinander höhenversetzt angeordnet.

Auf diese Weise kann bei Realisierung des Aktuatorelementes als Mikrospiegel ein zweiachsiger  
15 Mikrospiegelscanner erreicht werden, der die großen für hochauflösende Laserprojektion erforderlichen Scanwinkel im nichtresonanten Betrieb der langsamen Scanachse erzielen kann, ohne dass der Scanner selbst gleichzeitig zu fragil wird, d.h. dass die langsame  
20 Achse mit einer Resonanzfrequenz von rund 1 kHz oder höher realisiert werden kann. Die langsame Achse entspricht hierbei der Verkipfung um die äußere Kippachse. Horizontale Ablenkungen werden über die innere Kippachse im resonanten Betrieb mit der erforderlichen  
25 hohen Frequenz ermöglicht. Durch den elektrostatischen Antrieb in beiden Achsen lässt sich ein derartiger Mikrospiegelscanner bis auf Verspiegelungsschicht und Anschlussfelder vollständig aus Silizium und Siliziumdioxid für die Isolation fertigen. Dies ermöglicht  
30 wiederum ein vergleichsweise einfaches hermetisch dichtes Wafer-Level-Packaging basierend auf Standard-Wafer-Bond-Techniken.

- 16 -

Ein derartiger mikromechanischer Aktuator, bspw. in Form des beschriebenen zweiachsigen Mikrospiegel-scanners, lässt sich auch sehr kompakt realisieren. In einer vorteilhaften Ausgestaltung einer derartigen

5 kompakten Realisierung sind die ersten und zweiten kamm- oder fingerförmigen Elektroden beidseitig der äußeren Kippachse ausgebildet, wobei die Elektrodenfinger jeweils parallel zur äußeren Kippachse ausgerichtet sind. Dies ermöglicht die Anordnung der

10 kamm- oder fingerförmigen Elektroden sowohl des äußeren Kippantriebs als auch des inneren Kippantriebs auf den gleichen beiden sich gegenüber liegenden Seiten des Aktuators bzw. der äußeren Kippachse, so dass der Aktuator zwar in der Länge zunimmt, nicht jedoch in der

15 Breite. Über die Zunahme in der Länge lässt sich durch Erhöhung der Anzahl der kamm- oder fingerförmigen Elektroden das Drehmoment geeignet erhöhen, ohne gleichzeitig die Breite des Aktuators zu verändern. Damit lässt sich ein derartiger Aktuator sehr

20 vorteilhaft in flache Geräte, wie bspw. flache Mobiltelefone, integrieren.

Die Herstellungstechniken für einen derartigen mikromechanischen Aktuator sind dem Fachmann bekannt.

25 Hierzu werden, wie bereits in der Beschreibungseinleitung angeführt, in der Regel Siliziumtechniken eingesetzt, wobei die höhenversetzten kammförmigen Elektroden durch unterschiedliche Schichten in einem entsprechenden Schichtaufbau erzeugt werden. Auch

30 andere Techniken zur Erzeugung des Höhenversatzes sind selbstverständlich möglich. Die Verbindungselemente wie auch die Federn können bspw. aus Silizium gebildet sein, das eine ausreichende Elastizität für die

- 17 -

laterale Verbiegung bzw. Torsion der Feder gewährleistet. Im Vordergrund steht, dass die Federn den gewünschten funktionalen und einander gegenläufigen Kreisbahn-Bewegungen von Aktuatoreinheit und elektrostatischen Kippantrieben wenig Widerstand entgegen-  
5 setzen, da sonst ein Großteil der durch die vielen Elektroden der Kippantriebe hinzugewonnenen Kraft bereits wieder aufgebraucht würde. Hingegen soll die Feder jedoch die Vertikal-Komponente der Bewegung der  
10 elektrostatischen Kippantriebe möglichst direkt und verlustfrei übertragen.

#### **Kurze Beschreibung der Zeichnungen**

Der vorgeschlagene mikromechanische Aktuator wird  
15 nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen in Verbindung mit den Zeichnungen nochmals näher erläutert. Hierbei zeigen:

- 20 Fig. 1 ein erstes Beispiel für eine Ausgestaltung des mikromechanischen Aktuators als zweiachsiger Mikrospiegelscanner;
- 25 Fig. 2 ein zweites Beispiel einer Ausgestaltung des mikromechanischen Aktuators als zweiachsiger Mikrospiegelscanner;
- Fig. 3 ein drittes Beispiel einer Ausgestaltung des mikromechanischen Aktuators als zweiachsiger Mikrospiegelscanner; und
- 30 Fig. 4 eine schematische Darstellung der Verkipfung der Aktuatoreinheit des

- 18 -

mikromechanischen Aktuators im Querschnitt.

5           **Wege zur Ausführung der Erfindung**

Im Folgenden werden beispielhaft Ausgestaltungen für zweiachsige Mikrospiegelscanner gemäß der vorliegenden Erfindung erläutert, die Spiegeldurchmesser von mindestens 1 mm und eine Resonanzfrequenz  
10 der langsamen Achse von rund 1 kHz oder höher aufweisen und einen mechanischen Auslenkwinkel der langsamen Achse von rund  $\pm 7^\circ$  oder größer ermöglichen. Die Figuren 1 und 2 zeigen hierbei Ausgestaltungen eines derartigen Mikrospiegelscanners, bei denen gleichzeitig  
15 eine geringe Chipkantenlänge in einer zur Spiegelfläche parallelen Dimension erreicht wird.

In der Ausgestaltung der Figur 1 ist ein Mikrospiegel 1 gezeigt, der über Torsionsfedern 2 um eine  
20 entlang der Torsionsfedern 2 verlaufende Kippachse (innere Kippachse) drehbar in einem ihn umgebenden beweglichen Rahmen (Gimbal) 3 aufgehängt ist. Der Mikrospiegel 1 kann mit zwei elektrostatischen Kippantrieben, die höhenversetzte Kammelektroden 8, 9  
25 aufweisen, in dem beweglichen Rahmen 3 um die innere Kippachse verkippt werden. Der bewegliche Rahmen 3 (innerer Rahmen) ist wiederum über Torsionsfedern 4 um eine durch den Verlauf der Torsionsfedern 4 vorgegebene Kippachse (äußere Kippachse) drehbar in dem ihn  
30 umgebenden starren Chiprahmen 5 (äußerer Rahmen) aufgehängt. Die beiden Kippachsen stehen senkrecht zueinander. Der bewegliche innere Rahmen 3 lässt sich über zwei elektrostatische Kippantriebe 14, 15 in

- 19 -

vertikaler Richtung auslenken. Die Kippantriebe 14, 15 verfügen über eine Vielzahl relativ zum Chiprahmen 5 beweglicher Elektrodenfinger 16, deren statische höhenversetzte Gegenelektrodenfinger 17 am Chiprahmen 5 angebracht sind. Die beweglichen Elektrodenfinger 16 sind mit einer U-förmigen Ankerstruktur 12 verbunden, die ihrerseits mit dem inneren Rahmen 3 verbunden ist. Über die elektrische Ansteuerung der Elektrodenfinger 16 und Gegenelektrodenfinger 17 kann am Ende der U-förmigen Ankerstruktur 12 ein Vertikalhub bzw. eine Vertikalauslenkung erzeugt werden, die im wesentlichen durch den Höhenversatz der statischen und beweglichen Elektrodenfinger 16, 17 limitiert ist.

15 Aus Gründen der Fertigbarkeit und der Fertigungskosten stehen bei den meisten Fertigungsprozessen für derartige Kammantriebe keine größeren Höhenunterschiede als 30  $\mu\text{m}$  zur Verfügung. Um dennoch große Auslenkungen erzeugen zu können, wird in der hier vorgeschlagenen Anordnung die von den Kammantrieben erzeugte Vertikalbewegung über vertikal starre jedoch in sich lateral verbiegbare Blattfedern 13 auf den inneren Rahmen 3 übertragen. Die Blattfedern 13 weisen hier eine Länge von 300  $\mu\text{m}$ , eine Breite von 4  $\mu\text{m}$  und eine Höhe von 30  $\mu\text{m}$  auf und sind aus Silizium gebildet. Der laterale Abstand des Aufhängungspunktes der Blattfeder 13 am inneren Rahmen 3 bestimmt bei vorgegebener vertikaler Maximalauslenkung der Kammantriebe 14 bzw. 15 den maximal erzielbaren Kippwinkel des inneren Rahmens 3. Die auf diese Weise erreichte Vertikalhub-Übersetzung kann dazu genutzt werden, um mechanische Kippwinkel von  $\pm 10^\circ$  und mehr zu erzeugen. Für einen Kippwinkel von  $\pm 10^\circ$  ergibt sich ein maximaler lateraler Abstand des

- 20 -

Verbindungspunktes der Blattfeder 13 mit dem inneren Rahmen 3 von etwa 170  $\mu\text{m}$  zur äußeren Kippachse.

Eine Voraussetzung dafür, dass die Maximal-  
5 auslenkung der Antriebe 14 bzw. 15 erreicht wird, ist eine ausreichend große Anzahl höhenversetzter Kammelektrodenfinger. Die hier vorgeschlagene Anordnung hat den besonderen Vorteil, dass die Kammelektroden-  
anordnung sich nicht wesentlich in Achsenrichtung der  
10 äußeren Kippachse sondern senkrecht dazu ausdehnt. Bei einem zweiachsigen Scanner bringt dies den Vorteil mit sich, dass die vielen erforderlichen Antriebselektroden sich parallel zur ebenfalls ausgedehnten durch die Torsionsfedern 2 gebildete Spiegeltorsionsaufhängung  
15 erstrecken. Der Chip wird also durch die Antriebe des inneren Rahmens im Wesentlichen nur in der Richtung größer, in der er ohnehin bereits durch die vorhandene innere Drehachse besonders ausgedehnt ist. Da die Chipkantenlänge senkrecht dazu besonders klein bleiben  
20 kann, bspw. im Bereich von 2 mm, eignet sich ein solcher Mikrospiegelscanner bzw. Mikrospiegelchip besonders für den Einbau in äußerst flache Mobiltelefone.

25 Da die Kammantriebe 14, 15 über eigene Aufhängungen am starren Chiprahmen 5 befestigt sind, bspw. durch geeignete Torsions- oder Biegeaufhängungen 18, besitzen sie auch ein eigenes Rückstellmoment. Dieses Rückstellmoment trägt dazu bei, dass die Aktuatormasse  
30 nicht in erheblichem Maße die Resonanzfrequenz des beweglichen inneren Rahmens 3 erniedrigt. Daraus ergibt sich ein erheblicher Vorteil gegenüber der sonst freitragenden Anbringung der beweglichen Elektroden-

finger direkt am beweglichen inneren Rahmen 3, bei der es wegen des enormen Zuwachses des Trägheitsmomentes durch mitgeschleppte Zusatz-Masse der Elektrodenfinger zu einer deutlichen Erniedrigung der Resonanzfrequenz kommt. Beim vorgeschlagenen mikromechanischen Aktuator wird die Resonanzfrequenz des beweglichen Rahmens 3 ganz überwiegend durch die Gimbal-Struktur und dessen Torsionsaufhängung 4 bestimmt und nur in geringem Maße durch die Massen der Antriebe 14, 15 beeinflusst.

10

Figur 2 zeigt eine weitere Ausgestaltung für den vorgeschlagenen mikromechanischen Aktuator als zweiachsigen Mikrospiegelscanner. Diese Ausgestaltung unterscheidet sich von der Ausgestaltung der Figur 1 dadurch, dass der elektrostatische Kammantrieb 14, 15 hier über seinen zentralen Trägerbalken direkt am starren Chiprahmen 5 befestigt ist, wobei eine Eigenfederwirkung bei Vertikalbiegung dieses Trägerbalkens ausgenutzt wird. Das äußere Verbindungselement wird hier also durch den Trägerbalken selbst gebildet. Ansonsten entspricht die Ausgestaltung der der Figur 1.

20

Figur 3 zeigt wiederum einen ähnlichen Aufbau wie den der Figur 2. Jedoch sind hier die elektrostatischen Kammantriebe 14, 15 doppelt ausgeführt, um noch größere Kräfte erzeugen zu können. Der Mikrospiegel 1 ist wiederum über entsprechende Torsionsfedern 2 in einem inneren Rahmen (Gimbal) 3 aufgehängt. Die Antriebe für den Mikrospiegel 1 in diesem inneren Rahmen 3 sind hier in der Figur nicht dargestellt. Der bewegliche Rahmen 3 ist seinerseits über Torsionsfedern 4 im starren Chiprahmen 5 aufgehängt. Die elektrostatischen Kammantriebe 14, 15 verfügen über eine Vielzahl von

30

- 22 -

Fingerelektroden 8, die den höhenversetzten statischen  
Fingerelektroden 9 gegenüber stehen. Die Antriebe 14,  
15 sind jeweils doppelt vorhanden, liegen seitlich des  
beweglichen Rahmens 3 und münden einseitig direkt in  
5 den starren Chiprahmen 5. Am Ende der Antriebe 14, 15  
sind diese über Blattfedern 13 am beweglichen Rahmen 3  
nahe der Kippachse dieses beweglichen Rahmens 3  
befestigt. Ein derartig aufgebauter zweiachsiger  
elektrostatisch angetriebener Mikrospiegelscanner  
10 erreicht in gleicher Weise wie die Ausgestaltungen der  
Figuren 1 und 2 über zumindest eine nichtresonant  
betreibbare Achse und einen Übersetzungsmechanismus  
eine Amplitudenvergrößerung. Diese Ausgestaltung lässt  
sich allerdings nicht so Platz sparend realisieren wie  
15 die Ausgestaltungen der Figuren 1 und 2.

Figur 4 zeigt schließlich noch schematisiert die  
Verhältnisse bei der Auslenkung des inneren Rahmens 3  
durch die elektrostatischen Kammantriebe 14, 15 gemäß  
20 den Figuren 1 bis 3. Dargestellt ist hierbei eine  
Seitenansicht des einseitig ausgelenkten beweglichen  
inneren Rahmens 3. Dieser ist über Torsionsfedern 4 am  
starren Chiprahmen 5 befestigt. Die Antriebe 14, 15  
treiben den inneren Rahmen 3 an und sind jeweils am  
25 gegenüberliegenden Ende mit dem starren Chiprahmen 5  
verbunden. Die Blattfedern sind in dieser Ausgestaltung  
nicht direkt erkennbar, da sie sich zwischen den  
Antrieben 14 und 15 und dem beweglichen Rahmen 3 in die  
Blattebene hinein erstrecken. Sie verhalten sich  
30 hierbei in vertikaler Richtung starr, können sich  
jedoch in lateraler Richtung in sich verbiegen.

Bezugszeichenliste

|    |    |                                 |
|----|----|---------------------------------|
|    | 1  | Mikrospiegel                    |
| 5  | 2  | Torsionsfeder                   |
|    | 3  | innerer Rahmen                  |
|    | 4  | Torsionsfeder                   |
|    | 5  | starrer Chiprahmen              |
|    | 8  | Fingerelektroden                |
| 10 | 9  | Fingerelektroden                |
|    | 12 | U-förmige Ankerstruktur         |
|    | 13 | Blattfeder                      |
|    | 14 | elektrostatischer Kippantrieb   |
|    | 15 | elektrostatischer Kippantrieb   |
| 15 | 16 | bewegliche Elektrodenfinger     |
|    | 17 | statische Gegenelektrodenfinger |
|    | 18 | Torsions- oder Biegeaufhängung  |

Patentansprüche

1. Mikromechanischer Aktuator, insbesondere Mikrospiegelscanner, mit
- 5 - einer Aktuatoreinheit (1-3) in einem äußeren Rahmen (5), die über zwei sich entlang einer äußeren Kippachse der Aktuatoreinheit (1-3) erstreckende Torsionselemente (4) in dem äußeren Rahmen (5) aufgehängt ist, und
- 10 - elektrostatischen Kippantrieben (14, 15) aus ineinander greifenden ersten und zweiten kamm- oder fingerförmigen Elektroden (16, 17), die einen gegenseitigen Höhenversatz aufweisen und von denen die ersten Elektroden (17) starr mit dem äußeren Rahmen (5) und die zweiten Elektroden (16)
- 15 jeweils über ein äußeres Verbindungselement (18) mit dem äußeren Rahmen (5) und über ein inneres Verbindungselement (12, 13) mit der Aktuatoreinheit (1-3) verbunden sind,
- 20 wobei das äußere Verbindungselement (18) so ausgebildet ist, dass es in einer vertikalen Richtung zu einer Ebene des äußeren Rahmens (5) eine Verbiegung ermöglicht, und
- wobei das innere Verbindungselement (12, 13) zwei Federn umfasst, die sich parallel zur äußeren
- 25 Kippachse erstrecken, jeweils in einem Bereich der Aktuatoreinheit (1-3) mit dieser verbunden ist, der näher an der äußeren Kippachse als an einem der äußeren Kippachse gegenüber liegenden Rand der Aktuatoreinheit (1-3) liegt, und so ausgebildet und
- 30 angeordnet sind, dass sie in der vertikalen

- 25 -

Richtung starr und quer zur vertikalen Richtung biegsam sind.

2. Mikromechanischer Aktuator nach Anspruch 1,  
5 dadurch gekennzeichnet,  
dass die Federn als Blattfedern (13) ausgebildet sind.
3. Mikromechanischer Aktuator nach Anspruch 1 oder 2,  
10 dadurch gekennzeichnet,  
dass die Aktuatereinheit (1-3) ein Aktuatorelement (1) in einem inneren Rahmen (3) aufweist,  
das über weitere Torsionselemente (2), die sich  
15 entlang einer inneren Kippachse senkrecht zur  
äußeren Kippachse erstrecken, in dem inneren Rahmen (3) aufgehängt ist,  
wobei weitere elektrostatische Kippantriebe aus  
ineinander greifenden dritten und vierten kamm-  
oder fingerförmigen Elektroden (8, 9) zwischen dem  
20 inneren Rahmen (3) und dem Aktuatorelement (1)  
angeordnet sind,  
von denen die dritten Elektroden (9) starr mit dem  
inneren Rahmen (3) und die vierten Elektroden (8)  
mit dem Aktuatorelement (1) verbunden sind, um eine  
25 Verkippung des Aktuatorelementes (1) um die innere  
Kippachse antreiben zu können.
4. Mikromechanischer Aktuator nach Anspruch 3,  
dadurch gekennzeichnet,  
30 dass das Aktuatorelement (1) ein Mikrospiegel mit  
Abmessungen von mindestens 1 mm in einer lateralen  
Dimension ist.

- 26 -

5. Mikromechanischer Aktuator nach einem der Ansprüche  
1 bis 4,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die ersten und zweiten kamm- oder finger-  
förmigen Elektroden (16, 17) beidseitig der äußeren  
Kippachse ausgebildet sind, wobei die Elektroden-  
finger der kamm- oder fingerförmigen Elektroden  
(16, 17) parallel zur äußeren Kippachse ausge-  
richtet sind.
6. Mikromechanischer Aktuator nach einem der Ansprüche  
1 bis 5,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die ersten und zweiten kamm- oder finger-  
förmigen Elektroden (16, 17) so beidseitig der  
äußeren Kippachse ausgebildet und angeordnet sind,  
dass ihre Anzahl sich auf eine Länge des Aktuators  
senkrecht zur äußeren Kippachse nicht jedoch auf  
eine Breite des Aktuators parallel zur äußeren  
Kippachse auswirkt.
7. Mikromechanischer Aktuator nach einem der Ansprüche  
1 bis 6,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das innere Verbindungselement (12, 13) eine U-  
förmige Ankerstruktur (12) aufweist, die über zwei  
Federn mit der Aktuatoreinheit verbunden ist.
8. Mikromechanischer Aktuator nach einem der Ansprüche  
1 bis 7,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass das äußere Verbindungselement (18) neben einer

- 27 -

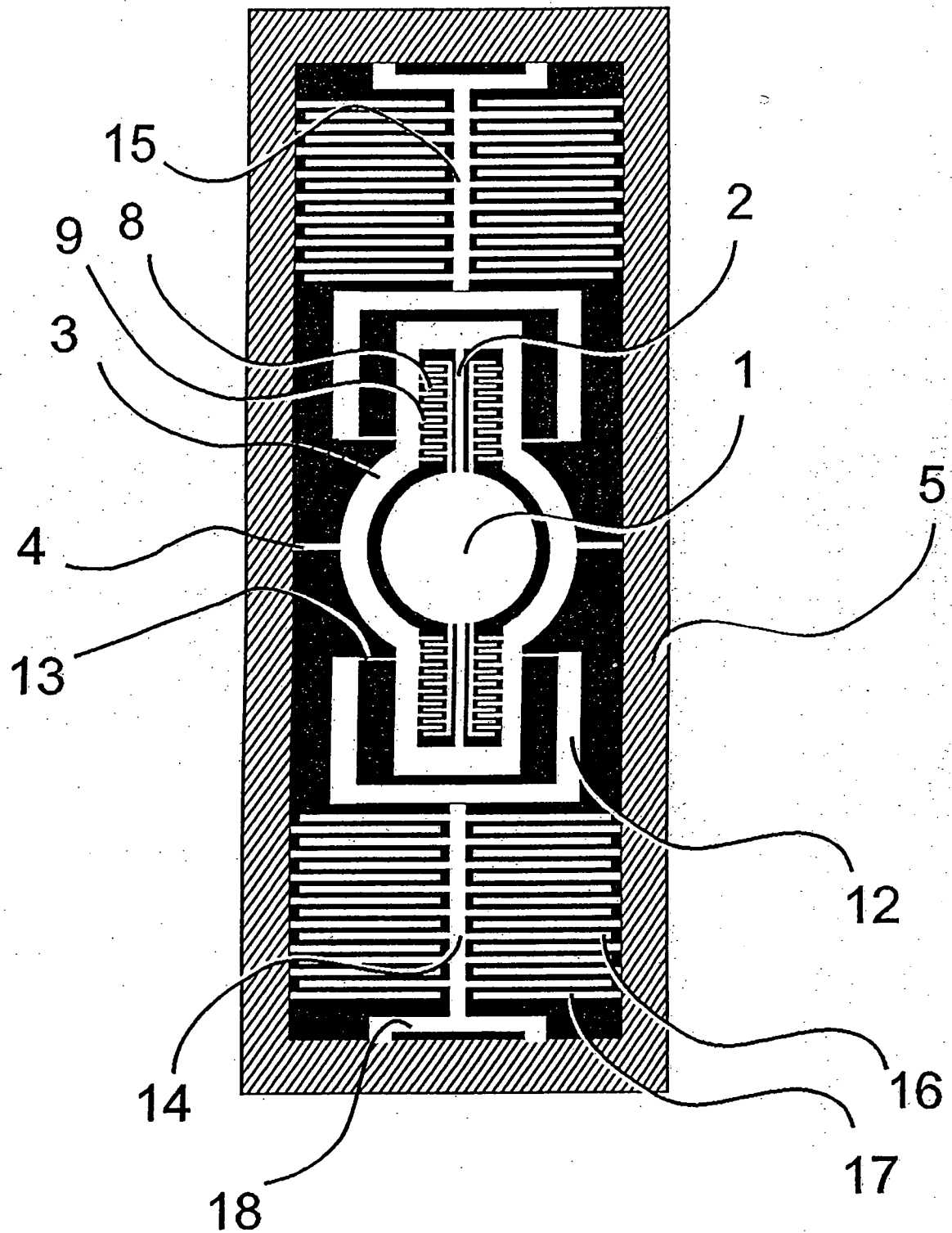
Verbiegung auch eine Torsion ermöglicht.

9. Mikromechanischer Aktuator nach einem der Ansprüche  
1 bis 8,

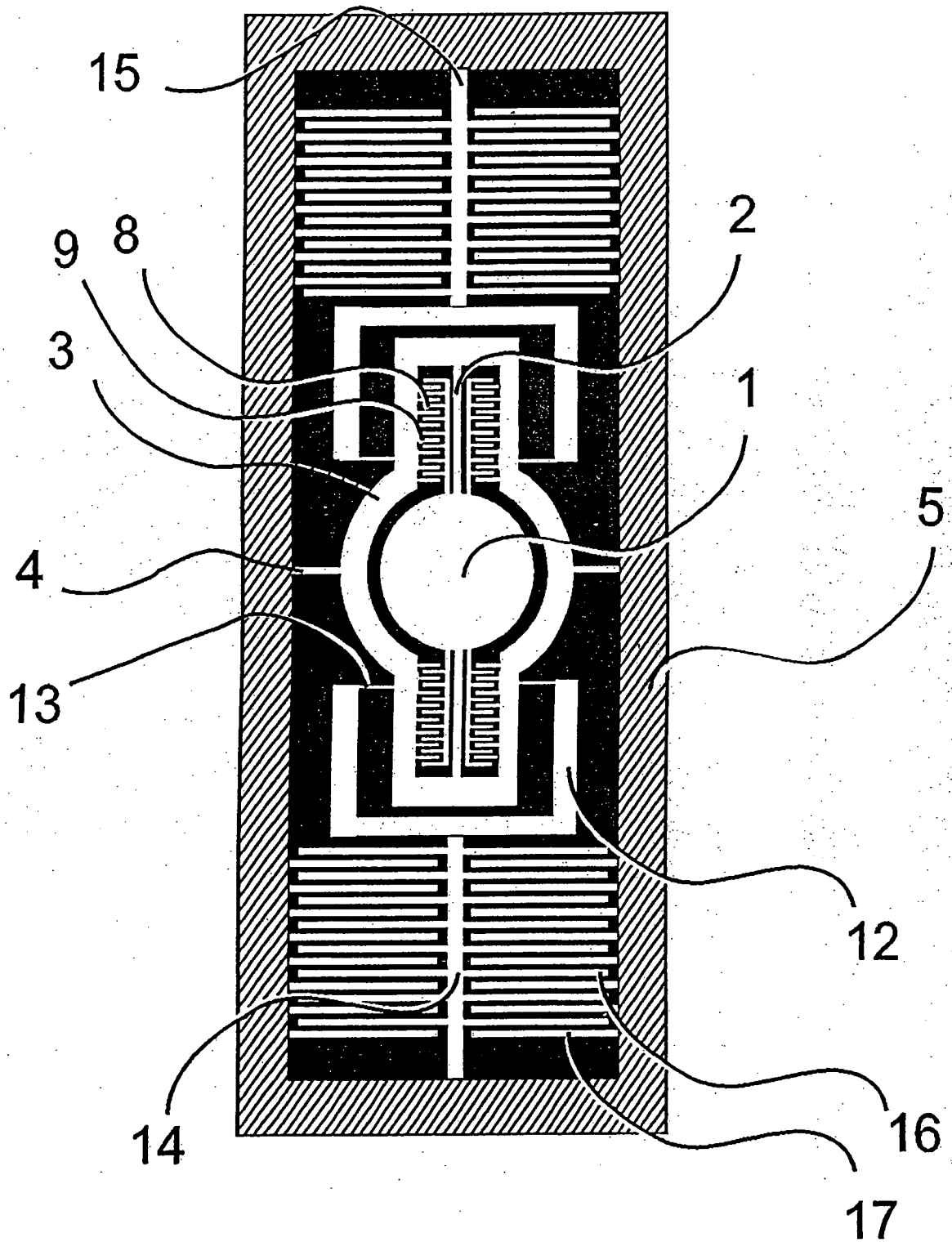
5       dadurch gekennzeichnet,  
      dass die Aktuatereinheit (1-3) so ausgebildet ist,  
      dass eine Resonanzfrequenz der Verkipfung um die  
      äußere Kippachse mindestens 1 kHz beträgt.

10

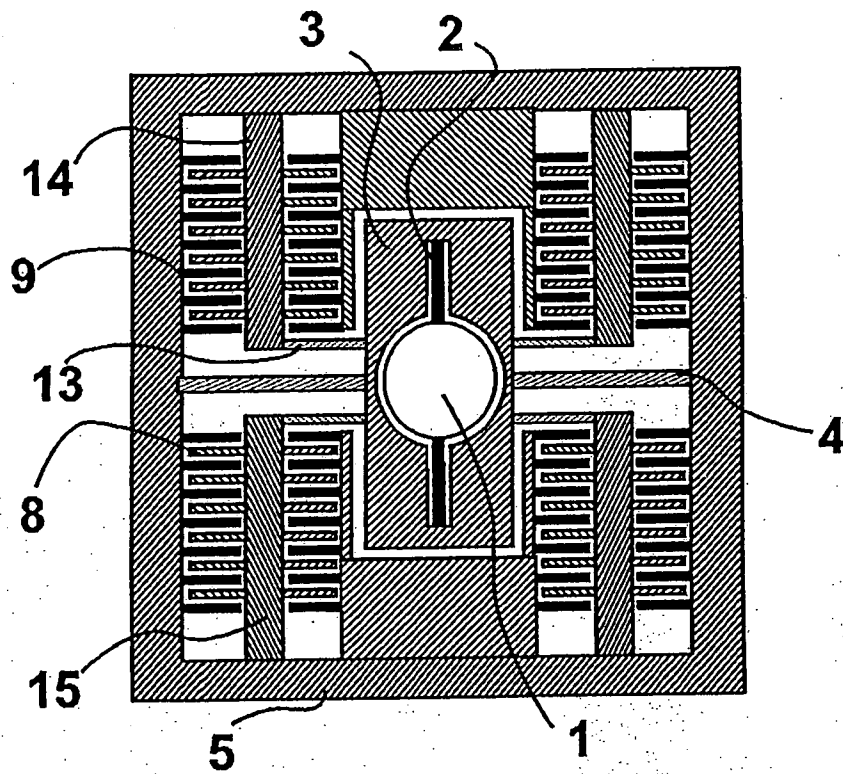
## Figur 1



Figur 2



Figur 3



Figur 4

