



(10) DE 10 2017 119 551 A1 2019.02.28

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: 10 2017 119 551.3
(22) Anmeldetag: 25.08.2017
(43) Offenlegungstag: 28.02.2019

(51) Int Cl.: **B81B 7/02** (2006.01)
B81B 3/00 (2006.01)
G01Q 30/00 (2010.01)
G01Q 60/24 (2010.01)
G01L 1/04 (2006.01)
G01L 1/08 (2006.01)
G02B 21/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dieses vertreten durch den Präsidenten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, DE

(74) Vertreter:
Gramm, Lins & Partner Patent- und Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig, DE

(72) Erfinder:
Li, Zhi, Dr., 38116 Braunschweig, DE; Brand, Uwe, Dr., 30916 Isernhagen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

Brand, Uwe, et al. "Comparing AFM cantilever stiffness measured using the thermal vibration and the improved thermal vibration methods with that of an SI traceable method based on MEMS." Measurement Science and Technology 28.3 (Januar 2017): 034010.

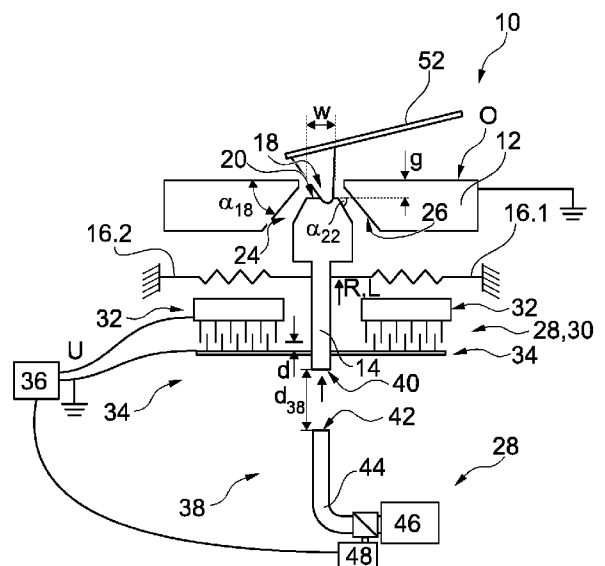
Gao, Sai, et al. "Towards quantitative determination of the spring constant of a scanning force microscope cantilever with a microelectromechanical nano-force actuator." Measurement Science and Technology 21.1 (2009) : 015103.

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Normal**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Normal (10) in Form eines mikro-elektromechanischen Systems mit (a) einem Referenz-Oberflächenelement (12), das (i) eine ebene Referenz-Oberfläche (O) und (ii) eine Ausnehmung (18) hat, (b) einem Schaft (14), (c) zumindest einer Feder (16), (d) wobei der Schaft (14) (i) quer zur Referenz-Oberfläche (O) bewegbar ist, (ii) eine ebene Stirnfläche (20) aufweist und (iii) in eine Null-Stellung bringbar ist, in der sich die Stirnfläche (20) entlang der Referenz-Oberfläche (O) erstreckt, (iv) wobei die zumindest eine Feder (16) einer Auslenkung (Δd) des Schafts (14) aus der Null-Stellung entgegenwirkt, und (e) einer Auslenkungserfassungsvorrichtung (28) zum Erfassen der Auslenkung (Δd).



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Normal. Ein Normal ist ein metrologischer Vergleichsgegenstand, der zur Kalibrierung anderer Messgeräte dient. Die Kalibrierung von Messgeräten für besonders kleine oder besonders große Größen ist dabei besonders herausfordernd. Beispielsweise ist die Kalibrierung von Mikroskopen, beispielsweise optischen Mikroskopen oder Rasterkraftmikroskopen, oft mit hoher Unsicherheit behaftet, da sehr kleine Kräfte oder Abstände gemessen werden müssen. Das führt zu vergleichsweise großen Messunsicherheiten.

[0002] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Kalibrierung von Mikroskopen zu verbessern.

[0003] Die Erfindung löst das Problem durch ein Normal in Form eines mikro-elektromechanischen Systems mit (a) einem Referenz-Oberflächenelement, das eine ebene Referenz-Oberfläche und eine Ausnehmung hat, (b) einen Schaft, (c) zumindest eine Feder, wobei (d) der Schaft quer zur Referenz-Oberfläche bewegbar ist, eine ebene Stirnfläche aufweist und in eine Null-Stellung bringbar ist, in der sich die Stirnfläche entlang der Referenz-Oberfläche erstreckt, wobei die zumindest eine Feder einer Auslenkung des Schafts aus der Null-Stellung entgegenwirkt, und (e) einer Auslenkungserfassungsvorrichtung zum Erfassen der Auslenkung.

[0004] Vorteilhaft an diesem Normal ist, dass es zur Kalibrierung von Rasterkraftmikroskopen verwandt werden kann. Dazu kann mit einem Kantilever des Rasterkraftmikroskops eine Kraft auf die Stirnfläche des Schafts ausgeübt werden, die sich dadurch quer zur Referenz-Oberfläche gegen die Kraft der Feder verschiebt. Die Auslenkung aus der Null-Stellung kann mit der Auslenkungserfassungsvorrichtung erfasst und basierend darauf die Kraft bestimmt werden. Mit anderen Worten handelt es sich bei dem Normal um ein Kraft-TransfERNormal, das Kräfte bis in den pN-Bereich transferieren kann. Das Normal kann daher in diesem Fall auch als pN-KrafttransfERNormal bezeichnet werden. Alternativ kann das Normal auch eine Verkörperung für eine Strecke sein. In diesem Fall wird die Stirnfläche, die gemäß einer bevorzugten Ausführungsform eben ist, um einen vorgegebenen Soll-Weg bewegt und diese Bewegung mit einem Mikroskop verfolgt.

[0005] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Merkmal, dass der Schaft quer zur Referenz-Oberfläche bewegbar ist, insbesondere verstanden, dass dann, wenn eine Kraft, die senkrecht zur Referenz-Oberfläche verläuft, auf die Stirnfläche wirkt, sich der Schaft in eine Bewegungsrichtung bewegt, wobei die Bewegungsrichtung mit der Referenz-Fläche einen Winkel von $90^\circ \pm \varepsilon$ ein-

schließt, wobei ε möglichst klein ist, beispielsweise höchstens 5° beträgt.

[0006] Unter dem Merkmal, dass sich die Stirnfläche entlang der Referenz-Oberfläche erstreckt, wird insbesondere verstanden, dass die Referenz-Oberfläche in guter Näherung als Ebene beschrieben werden kann.

[0007] Die Stirnfläche ist ebenfalls durch eine Ebene im mathematischen Sinne näherbar, wobei eine Abweichung ebenfalls höchstens $1 \mu\text{m}$ beträgt. Unter dem Merkmal, dass die Stirnfläche sich entlang der Referenz-Oberfläche erstreckt, wird insbesondere verstanden, dass ein Winkel zwischen den beiden Ebenen höchstens 15° , insbesondere 3° , beträgt. Ein minimal möglicher Abstand der beiden Ebenen beträgt beispielsweise höchstens $1 \mu\text{m}$, insbesondere höchstens 100 nm .

[0008] Die Ausnehmung hat vorzugsweise eine Öffnungsspalte von zumindest $2 \mu\text{m}$ und/oder höchstens $500 \mu\text{m}$. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass einerseits ein Kantilever hinreichend tief durch die Ausnehmung hindurchgreifen kann und andererseits die Referenz-Oberfläche und die Stirnfläche nur einen kleinen Winkel versetzt zueinander haben. Unter dem Innendurchmesser wird dabei insbesondere der Innendurchmesser verstanden, also der Durchmesser des gedachten Zylinders maximalen Durchmessers, der durch die Ausnehmung passt.

[0009] Vorzugsweise sind das Referenz-Oberflächenelement und der Schaft elektrisch miteinander verbunden, das heißt, dass sie stets das gleiche elektrostatische Potential haben. Das verhindert eine elektrostatische Kraft zwischen dem Referenz-Oberflächenelement und dem Kantilever eines zu kalibrierenden Rasterkraftmikroskops.

[0010] Vorzugsweise sind das Referenz-Oberflächenelement und der Schaft aus dem gleichen Material gefertigt. Dann sind die Spitze-Oberfläche-Interaktionen eines Kantilevers an beiden Objekten gleich, sodass systematische Messfehler vermieden werden. Beispielsweise sind das Referenz-Oberflächenelement und der Schaft aus Silizium gefertigt.

[0011] Unter der Auslenkungserfassungsvorrichtung wird insbesondere eine Struktur verstanden, mittels der eine Auslenkung, also eine Veränderung der Position des Schafts relativ zu einer Ausgangs-Position, insbesondere zur Null-Stellung, bestimmbar ist. Insbesondere ist die Auslenkungserfassungsausrichtung so ausgebildet, dass durch Erfassen einer Messgröße auf eindeutige Weise die Auslenkung bestimmbar ist. Es kann sich bei dieser Messgröße um einen Weg handeln, das ist aber nicht notwendig. Insbesondere ist es möglich, dass die Auslenkung auf Basis ei-

nes elektrischen und/oder optischen Messgeräts erfassbar ist.

[0012] Ein Normal umfasst stets einen zugehörigen Kalibrierschein, in dem die relevanten Größen, im vorliegenden Fall die Federkonstante/oder die Abhängigkeit der Auslenkung von einer Messgröße, die von der Auslenkungserfassungsvorrichtung abgreifbar ist, angegeben ist.

[0013] Unter dem Merkmal, dass das Normal in Form eines mikro-elektromechanischen Systems ausgebildet ist, wird insbesondere verstanden, dass das Referenz-Oberflächenelement, die Feder und der Schaft, sowie gegebenenfalls einen Antrieb für den Schaft, aus einem Substrat, insbesondere einem Silizium-Einkristall, herausgearbeitet, insbesondere herausgeätzt sind.

[0014] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzt das Normal einen Antrieb, der mit dem Schaft verbunden ist und mittels dem der Schaft quer zur Referenz-Oberfläche bewegbar ist. Wenn das Normal, wie gemäß seiner bevorzugten Ausführungsform vorgesehen, ein Piconewton -Krafttransfornormal ist, kann der Schaft auch als Kraftaufnehmer bezeichnet werden. Unter einem Piconewton -Krafttransfornormal wird ein Krafttransfornormal, mit dem Kräfte im Bereich von Piconewton kalibriert werden können, insbesondere mit einer Messunsicherheit von höchstens 10^{-4} .

[0015] Besonders bevorzugt ist der Antrieb ein elektrostatischer Kammantrieb und weist eine erste Kammelektrode und eine zweite Kammelektrode auf. Derartige Kammantriebe sind vereinfacht als mikro-elektromechanisches System (MEMS) herstellbar und erlauben zudem eine kapazitive Messung der Auslenkung.

[0016] Günstig ist es, wenn das Normal eine Auswerteeinheit aufweist, die mit den Kammelektroden zum Bestimmen einer Kapazität der Kammelektroden relativ zueinander ausgebildet ist. Die Kammelektroden sind gegeneinander isoliert und bilden einen Kondensator, dessen Kapazität vom Abstand der beiden Kammelektroden voneinander abhängt. Durch Messen der Kapazität der beiden Kammelektroden relativ zueinander kann daher der Abstand der beiden Kammelektroden voneinander und damit die Auslenkung bestimmt werden.

[0017] Vorzugsweise besitzt der Schaft einen Kopf, in dem die Stirnfläche ausgebildet ist und der eine kegelstumpfförmige Mantelfläche hat, wobei die kegelstumpfförmige Mantelfläche einen Kopf-Kegelwinkel aufweist. Die Ausnehmung ist vorzugsweise ebenfalls kegelstumpfförmig und erweitert sich von der Referenz-Oberfläche weg und hat einen Ausnehmungs-Kegelwinkel, der dem Kopf-Kegelwinkel ent-

spricht. Unter dem Merkmal, dass die beiden Kegelwinkel einander entsprechen, wird insbesondere verstanden, dass es zwar möglich, nicht aber notwendig ist, dass die beiden Kegelwinkel im mathematischen Sinne gleich sind. Vielmehr ist es möglich, dass beide voneinander so weit abweichen, dass die Funktion des Normals nicht beeinträchtigt ist. Beispielsweise beträgt eine Differenz zwischen den beiden Kegelwinkeln maximal 5° .

[0018] Günstig ist es, wenn die Auslenkungserfassungsvorrichtung ein Interferometer, insbesondere ein Fabry-Perot-Interferometer, umfasst, das einen ersten Spiegel, der mit dem Schaft verbunden ist, einen zweiten Spiegel und eine Lichtquelle aufweist. Vorzugsweise ist der erste Spiegel am Schaft als spiegelnde Fläche ausgebildet. Mit anderen Worten ist eine Fläche des Schafts so glatt ausgebildet, dass sie als Spiegel fungieren kann.

[0019] Vorzugsweise ist der zweite Spiegel als spiegelnde Fläche einer Lichtleitfaser ausgebildet, wobei die Lichtleitfaser als Lichtquelle fungiert. In diesem Fall bilden die beiden Spiegel ein Fabry-Perot-Interferometer, das Interferenzmuster wird in die Lichtleitfaser eingekoppelt und beispielsweise von der Auswerteeinheit ausgewertet.

[0020] Vorzugsweise ist die Lichtquelle ausgebildet zum Abgeben von Licht einer Wellenlänge, wobei für einen Nullkraft-Abstand zwischen einer ersten Ausgleichsebene durch die Referenz-Oberfläche und einer zweiten Ausgleichsebene durch die Stirnfläche bei Abwesenheit einer externen Kraft auf den Schaft

$$g = \left(M - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{4} + \varepsilon \text{ gilt. Dabei ist } M \text{ eine natürliche Zahl und es gilt } |\varepsilon| < \frac{1}{10} \left(M - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{4}.$$

[0021] Vorzugsweise umfasst die Lichtquelle einen Laser, der beim Betrieb Licht dieser Wellenlänge aussendet. Vorzugsweise handelt es sich um monochromatisches Licht.

[0022] Vorzugsweise hat die zumindest eine Feder eine Federkonstante bezüglich einer Auslenkung quer zur Referenz-Oberfläche von höchstens 1000 Newton pro Meter. Vorzugsweise ist die Federkonstante größer als 0,01 Newton pro Meter.

[0023] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die Auswerteeinheit eingerichtet zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten: (i) Erfassen einer Auslenkung des Schafts, die von einer auf den Schaft wirkenden Kraft bedingt ist, und (ii) Berechnen der Kraft aus der Auslenkung. Die Auslenkung wird beispielsweise anhand einer Federkonstante oder anhand eines Kennfeldes, in dem die Beziehung zwischen der Auslenkung und der Kantile-

ver-Kraft abgelegt ist, berechnet. Die Federkonstante und/oder das Kennfeld werden in Vorversuchen ermittelt. Dazu wird beispielsweise ein übergeordnetes Normal verwendet.

[0024] Alternativ ist die Auswerteeinheit eingerichtet zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten: (i) Regeln einer Spannung, die zwischen den Kammelektroden anliegt, sodass die Auslenkung, die von einer auf die Stirnfläche wirkenden Kraft verursacht ist, kompensiert wird, (ii) Erfassen der zum Kompensieren notwendigen Kompensationsspannung und (iii) Berechnen der aufgebrachten Kraft aus der Kompensations-Spannung. Dazu ist in der Auswerteeinheit vorzugsweise ein Datensatz gespeichert, der die Abhängigkeit der Kraft von der Kompensations-Spannung kodiert.

[0025] Erfindungsgemäß ist zudem ein Verfahren zum Kalibrieren eines Rasterkraftmikroskops mit den Schritten: (i) Ausüben einer Soll-Kraft mit einem Kantelever des Rasterkraftmikroskops auf eine Stirnfläche eines Schafts eines erfindungsgemäßen pN-TransferNormals, (ii) Messen einer Ist-Kraft mittels des pN-KrafttransferNormals und (iii) Kalibrieren des Rasterkraftmikroskops anhand der Ist-Kraft.

[0026] Ein erfindungsgemäßes Verfahren ist zudem ein solches, bei dem ein optisches Mikroskop kalibriert wird und das die Schritte. (i) Ermitteln einer ersten Ist-Position und einer zweiten Ist-Position der Stirnfläche eines erfindungsgemäßen Normals mittels des Normals; (ii) Ermitteln der zugehörigen ersten Mess-Position und der zweiten Mess-Position der Stirnfläche mittels des Mikroskops und Kalibrieren des Mikroskops anhand der Ist-Position; umfasst.

[0027] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 eine schematische Zeichnung eines erfindungsgemäßen Normals und

Fig. 2 eine Zeichnung eines erfindungsgemäßen Normals.

[0028] **Fig. 1** zeigt ein erfindungsgemäßes Normal, das im vorliegenden Fall als pN-KrafttransferNormal ausgebildet ist und ein Referenz-Oberflächenelement **12** mit einer Referenz-Oberfläche **O**, einem Schaft **14** und zwei Federn **16.1**, **16.2**. Im Referenz-Oberflächenelement **12** ist eine Ausnehmung **18** eingebracht, die einen Innendurchmesser **w**, beispielsweise $w = 6 \mu\text{m}$, aufweist.

[0029] Die Federn **16.i** ($i = 1, \dots, N$, wobei N die Zahl der Federn ist) halten den Schaft **14** so, dass er in eine Bewegungsrichtung **R** geführt von den Federn **16.i** gelagert ist. Die Bewegungsrichtung **R** verläuft quer zur Referenz-Oberfläche **O**. Im vorliegenden Fall ist

der Winkel zwischen der Referenz-Oberfläche **O** und der Bewegungsrichtung **R** 90° .

[0030] Der Schaft **14** besitzt eine ebene Stirnfläche **20**, die quer zur Bewegungsrichtung **R** und damit parallel zur Referenz-Oberfläche **O** verläuft. Unter „parallel“ wird in diesem Fall verstanden, dass es zwar möglich, nicht aber notwendig ist, dass die Referenz-Oberfläche **O** und Stirnfläche **20** im streng mathematischen Sinne parallel zueinander verlaufen. Eine kleine Abweichung von beispielsweise maximal 5° ist möglich.

[0031] Der Schaft **14** besitzt einen Kopf **22**, der eine kegelstumpfförmige Mantelfläche **24** hat. Die Fläche bildet mit der Bewegungsrichtung **R**, die gleichzeitig eine Längsachse **L** des Schafts **14** darstellt, einen Kopf-Kegelwinkel α_{22} . Die Ausnehmung **18** ist ebenfalls kegelstumpfförmig berandet und besitzt eine Kegelfläche **26**, die einen Ausnehmungskegelwinkel α_{18} mit der Referenz-Oberfläche **O** bildet. Der Kopf-Kegelwinkel α_{22} entspricht dem Ausnehmungs-Kegelwinkel α_{18} . Insbesondere weichen beide um höchstens 5° voneinander ab.

[0032] Das Normal **10** besitzt eine Auslenkungserfassungsvorrichtung **28**, die im vorliegenden Fall einen Kammantrieb **30** umfasst. Der elektrostatische Kammantrieb **30** besitzt eine erste Kammelektrode **32** und eine zweite Kammelektrode **34**, die zueinander beweglich angeordnet und gegeneinander elektrisch isoliert sind, sodass durch Beaufschlagen der Kammelektroden **32**, **34** eine elektrostatische Anziehungs- oder Abstoßungskraft zwischen den beiden Kammelektroden **32**, **34** erzeugbar ist. Die Kammelektroden **32**, **34** sind mit einer schematisch eingezeichneten Auswerteeinheit **36** verbunden, mittels der eine Kapazität **C** der beiden Kammelektroden **32**, **34** zueinander messbar ist. Aus dieser Kapazität kann auf eindeutige Weise ein Abstand **d** zwischen den Kammelektroden **32**, **34** berechnet werden.

[0033] Alternativ oder zusätzlich kann die Auslenkungserfassungsvorrichtung **28** ein Interferometer **38** aufweisen, das im vorliegenden Fall als Fabry-Perot-Interferometer ausgebildet ist. Dieses besitzt einen ersten Spiegel **40**, der durch eine verspiegelte Seitenfläche des Schafts **14** gebildet ist. Das Interferometer **38** besitzt zudem einen zweiten Spiegel **42**, der durch eine verspiegelte Oberfläche einer Lichtleitfaser **44** gebildet ist. Die Lichtleitfaser **44** stellt eine Lichtquelle dar und ist mit einem Laser **46** verbunden. Dieser Laser gibt Licht, vorzugsweise monochromatisches Licht, einer Wellenlänge λ ab, wobei unter dieser Wellenlänge die Vakuumwellenlänge gemeint ist. Je nach Abstand d_{38} kommt es zur konstruktiven oder destruktiven Interferenz einer stehenden Welle zwischen den Spiegeln **40**, **42**. Das entsprechende Interferenzmuster wird in die Lichtleitfaser **44** einge-

koppelt und von einem Sensor **48** erfasst, der mit der Auswerteeinheit **36** verbunden ist.

[0034] Wenn das Normal **10** ein Interferometer aufweist, ist es günstig, wenn der Kammantrieb **30** lediglich als Antrieb zum Bewegen des Schafts **14** verwendet wird, nicht aber zum Erfassen einer Position des Schafts **14**, da die Messgenauigkeit des Interferometers **38** in der Regel deutlich größer ist.

[0035] Die Stirnfläche **20** hat von der Referenz-Oberfläche **O** Nullkraft-Abstand g , der von der Auswerteeinheit aus dem Abstand d errechnet wird. Dazu wird ein Korrekturwert zum Abstand d hinzuaddiert oder abgezogen. Der Nullkraft-Abstand wird vorzugs-

weise so gewählt, dass $g = \left(M - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{4} + \varepsilon$ gilt, wobei M eine natürliche Zahl ($M = \{1, 2, \dots\}$) ist. In der Regel ist M kleiner als 10.

[0036] Eine Federkonstante k für alle Federn **16.i** gemeinsam beträgt beispielsweise $k = 0,05$ N/m. Zwischen einer auf die Stirnfläche **20** aufgebrachten Kraft F_{20} und einer Änderung Δd des Abstands d besteht damit die Beziehung $F_{20} = k\Delta d$.

[0037] Fig. 2 zeigt einen maßstabgerechten Ausschnitt eines erfindungsgemäßen Normals **10**. Es ist zu erkennen, dass das Normal **10** vier Feder **16.1**, **16.2**, **16.3**, **16.4** aufweist, die allesamt mäanderförmig ausgebildet sind, um eine besonders kleine Federkonstante k zu erreichen. Der Schaft **14** weist ein Zellenstruktural **50** auf, um eine möglichst geringe Masse zu erreichen. Die in Fig. 2 gezeigten Komponenten des Normals **10** sind lithographisch aus einem Silizium-Einkristall herausgeätzt. Das Normal **10** ist daher ein mikro-elektromechanisches System (MEMS).

[0038] Zum Durchführen eines erfindungsgemäßen Verfahrens wird das Normal **10** in ein Rasterkraftmikroskop eingebracht. Mit einem Kantilever **52** (Fig. 1) kann zunächst die Referenz-Oberfläche **O** abgetastet werden. Die Referenz-Oberfläche **O** kann damit gleichzeitig als Oberflächennormal dienen. Zum Kalibrieren der Kraftmessung des Rasterkraftmikroskops wird der Kantilever **52** so positioniert, dass seine Spitzen auf die Stirnfläche **20** gedrückt und so die Kraft F_{20} ausgeübt wird.

[0039] Die Auslenkungsverfassungsvorrichtung **28**, im vorliegenden Fall in Form des Fabry-Perot-Interferometers **38** misst beständig den Abstand d . Die Auswerteeinheit **36** ist so ausgebildet, dass sie eine Spannung U zwischen die beiden Kammelektroden **32**, **34** anlegt, wobei die Spannung U so gewählt ist, dass die entstehende elektrostatische Kraft F_{el} der Kraft F_{20} entspricht. In anderen Worten wird die Spannung U so geregelt, dass die Verschiebung Δd des Schafts **14** null ist.

[0040] Aus der angelegten Spannung U berechnet dann die Auswerteeinheit **36** die Kraft F_{20} . Alternativ wird keine Spannung U oder eine konstante Spannung U angelegt und die Auslenkung Δd , insbesondere mittels des Interferometers **38**, gemessen. Aus der Auslenkung und der Federkonstante k wird dann die Kraft F_{20} berechnet.

[0041] Alternativ wird das Normal **10** in einem optischen Mikroskop eingebracht und auf die Stirnfläche **20** fokussiert. Danach wird mittels des Kammantriebs **30** eine Verschiebung Δd eingestellt und mittels der Auslenkungserfassungsvorrichtung **28**, insbesondere des Interferometers **38**, vermessen. Der vom optischen Mikroskop aufgenommene entsprechende Messwert wird mit dem vom Normal **10** gemessenen Messwert verglichen und auf diese Weise das optische Mikroskop kalibriert.

Bezugszeichenliste

10	Normal
12	Referenz-Oberflächenelement
14	Schaft
16	Feder
18	Ausnehmung
20	Stirnfläche
22	Kopf
24	Mantelfläche
26	Kegelfläche
28	Auslenkungserfassungsvorrichtung
30	Antrieb, Kammantrieb
32	erste Kammelektrode
34	zweite Kammelektrode
36	Auswerteeinheit
38	Interferometer
40	erster Spiegel
42	zweiter Spiegel
44	Lichtquelle, Lichtleitfaser
46	Laser
48	Sensor
50	Zellenstruktur
52	Kantilever
C	Kapazität
d	Abstand
F₂₀	Kraft
g	Nullkraft-Abstand

i	Laufindex
k	Federkonstante
L	Längsachse
M	natürliche Zahl
N	Zahl der Federn
O	Referenz-Oberfläche
R	Bewegungsrichtung
w	Innendurchmesser
α_{18}	Ausnehmungs-Kegelwinkel
α_{22}	Kopf-Kegelwinkel
λ	Wellenlänge
Δd	Auslenkung
U	Spannung
F_{el}	elektrostatische Kraft

Patentansprüche

1. Normal (10) in Form eines mikro-elektromechanischen Systems mit

- (a) einem Referenz-Oberflächenelement (12), das
 - (i) eine ebene Referenz-Oberfläche (O) und
 - (ii) eine Ausnehmung (18) hat,
- (b) einem Schaft (14),
- (c) zumindest einer Feder (16),
- (d) wobei der Schaft (14)
 - (i) quer zur Referenz-Oberfläche (O) bewegbar ist,
 - (ii) eine ebene Stirnfläche (20) aufweist und
 - (iii) in eine Null-Stellung bringbar ist, in der sich die Stirnfläche (20) entlang der Referenz-Oberfläche (O) erstreckt,
 - (iv) wobei die zumindest eine Feder (16) einer Auslenkung (Δd) des Schafts (14) aus der Null-Stellung entgegenwirkt, und
- (e) einer Auslenkungserfassungsvorrichtung (28) zum Erfassen der Auslenkung (Δd).

2. Normal (10) nach Anspruch 1, **gekennzeichnet durch** einen Antrieb (30),

- der mit dem Schaft (14) verbunden ist und
- mittels dem der Schaft (14) quer zur Referenz-Oberfläche (O) bewegbar ist.
- wobei der Antrieb ein elektrostatischer Kammantrieb (30) ist und eine erste Kammelektrode (32) und eine zweite Kammelektrode (34) aufweist.

3. Normal (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (a) der Schaft (14) einen Kopf (22),
- an dem die Stirnfläche (20) ausgebildet ist und
- der eine kegelstumpfförmige Mantelfläche (24) hat, besitzt,
- wobei die kegelstumpfförmige Mantelfläche (24) einen Kopf-Kegelwinkel (α_{22}) aufweist, und dass
- (b) die Ausnehmung (18)

- kegelstumpfförmig ist,
- sich von der Referenz-Oberfläche (O) weg erweitert und
- einen Ausnehmungs-Kegelwinkel (α_{18}) hat, der dem Kopf-Kegelwinkel (α_{22}) entspricht.

4. Normal (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kopf-Kegelwinkel (α_{22}) $30^\circ \pm 5^\circ$ beträgt.

5. Normal (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Auslenkungserfassungsvorrichtung (28) ein Interferometer (38), insbesondere ein Fabry-Perot-Interferometer, umfasst, das

- einen ersten Spiegel (40), der mit dem Schaft (14) verbunden ist,
- einen zweiten Spiegel (42) und
- eine Lichtquelle (44) aufweist.

6. Normal (10) nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (a) die Lichtquelle (44) zum Abgeben von Licht einer Wellenlänge (λ) ausgebildet ist und
- (b) für einen Nullkraft-Abstand (g) zwischen einer ersten Ausgleichsebene durch die Referenz-Oberfläche (O) und einer zweiten Ausgleichsebene durch die Stirnfläche (20) bei Abwesenheit einer externen Kraft (F_{20}) auf den Schaft (14)

$$g = \left(M - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{4} + \varepsilon \text{ gilt, wobei } M \text{ eine natürliche Zahl}$$

$$\text{ist und } |\varepsilon| < \frac{1}{10} \left(M - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{4} \text{ gilt.}$$

7. Normal (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zumindest eine Feder (16) eine Federkonstante (k) bezüglich einer Auslenkung (Δd) quer zur Referenz-Oberfläche (O) von höchstens 1 Millinewton pro Mikrometer hat.

8. Normal (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Auswerteeinheit (36), die eingerichtet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

- (i) Erfassen einer Auslenkung (Δd) des Schafts (14), die von einer auf den Schaft (14) wirkenden Kraft (F_{20}) bedingt ist, und
- (ii) Berechnen der Kraft (F_{20}) aus der Auslenkung (Δd).

9. Normal (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **gekennzeichnet durch** eine Auswerteeinheit (36), die eingerichtet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

- (i) Regeln einer Spannung (U), die zwischen den Kammelektroden (32, 34) anliegt, so dass die Auslenkung (Δd), die von einer auf die Stirnfläche (20) wirkenden Kraft (F_{20}) verursacht ist, kompensiert wird,

- (ii) Erfassen der zum Kompensieren notwendigen Kompensations-Spannung und
- (iii) Berechnen der aufgebrachten Kraft (F_{20}) aus der Kompensations-Spannung.

10. Verfahren zum Kalibrieren eines Rasterkraftmikroskops mit den Schritten:

- (i) Ausüben einer Soll-Kraft mit einem Kantilever (52) des Rasterkraftmikroskops auf eine Stirnfläche (20) eines Schafts (14) eines Normals (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
- (ii) Messen einer Ist-Kraft mit dem Normal (10) in Form eines Piconewton-KrafttransfERNormals und
- (iii) Kalibrieren des Rasterkraftmikroskops anhand der Ist-Kraft.

11. Verfahren zum Kalibrieren eines optischen Mikroskops mit den Schritten:

- (i) Ermitteln einer ersten Ist-Position und einer zweiten Ist-Position der Stirnfläche (20) eines Normals (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
- (ii) Ermitteln der ersten Mess-Position und der zweiten Mess-Position der Stirnfläche (20) mittels des Mikroskops und
- (iii) Kalibrieren des Mikroskops anhand der Ist-Positionen.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

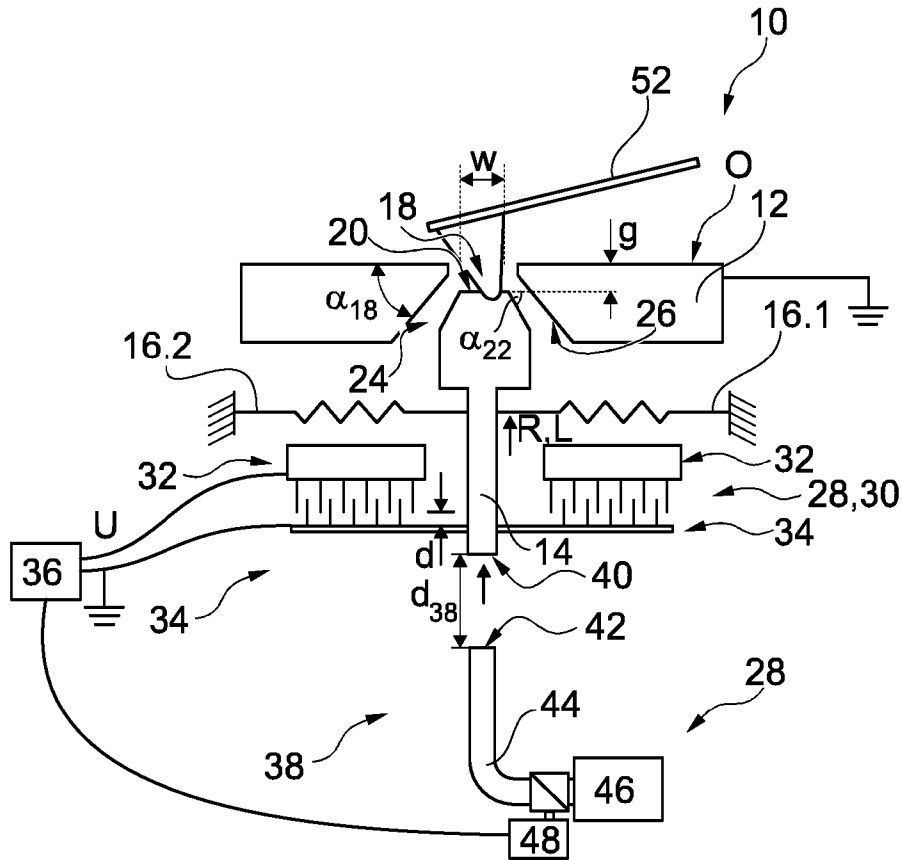


Fig. 1

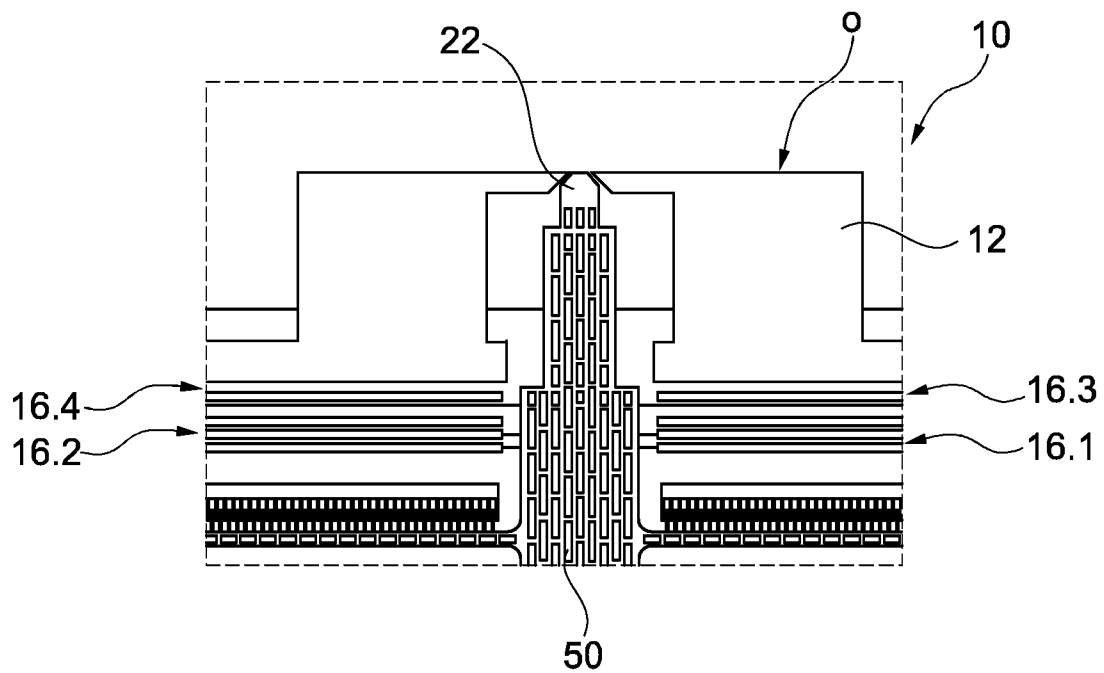


Fig. 2