



(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2012 204 572.4

(51) Int Cl.: G01B 11/02 (2012.01)

(22) Anmeldetag: 22.03.2012

G01D 5/26 (2012.01)

(43) Offenlegungstag: 26.09.2013

G01D 5/38 (2012.01)

G01B 11/00 (2012.01)

(71) Anmelder:

Dr. Johannes Heidenhain GmbH, 83301,  
Traunreut, DE

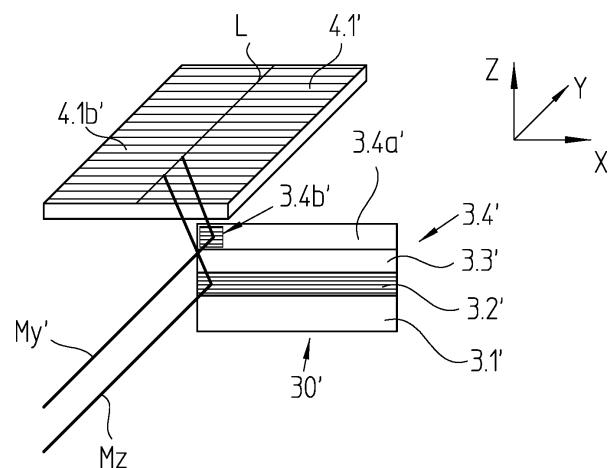
(72) Erfinder:

Holzapfel, Wolfgang, Dr., 83119, Obing, DE;  
Drescher, Jörg, Dr., 83122, Samerberg, DE;  
Meissner, Markus, Dr., 83236, Übersee, DE;  
Joerger, Ralph, Dr., 83278, Traunstein, DE; Musch,  
Bernhard, Dr., 83624, Otterfing, DE; Kälberer,  
Thomas, 86529, Schrobenhausen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: Positionsmeßeinrichtung und Anordnung mit einer derartigen Positionsmeßeinrichtung

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft eine Positionsmeßeinrichtung sowie eine Anordnung mit einer derartigen Positionsmeßeinrichtung. Die Positionsmeßeinrichtung dient zur Erfassung der Position eines ersten Objekts in Bezug auf ein zweites Objekt, wobei das erste und das zweite Objekt entlang mindestens zweier Messrichtungen relativ zueinander beweglich angeordnet sind. Die Positionsmeßeinrichtung weist eine Optikeinheit auf, die mit einem der beiden Objekte verbunden ist und mindestens eine Lichtquelle, eine Detektoranordnung sowie weitere optische Elemente in definierter Anordnung umfasst. Ferner umfasst die Positionsmeßeinrichtung eine Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit, welche am anderen Objekt angeordnet ist und mindestens zwei unterschiedlich ausgebildete Bereiche in einer Spur aufweist, die zur Positionserfassung mit der Optikeinheit optisch abtastbar sind. Über die unterschiedliche Ausbildung der Bereiche ist bei der Positionserfassung eine Umschaltung zwischen den verschiedenen Messrichtungen möglich; für jede Messrichtung sind mit der Optikeinheit jeweils Positionssignale bezüglich der Relativbewegung der beiden Objekte erzeugbar.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft eine Positionsmesseinrichtung und eine Anordnung mit einer derartigen Positionsmesseinrichtung.

**[0002]** In Maschinen, die bei der Fertigung und Prüfung von Halbleiterbauelementen zum Einsatz kommen, besteht oftmals die Anforderung, Objekte präzise zu positionieren. So kann es etwa erforderlich sein, Wafer hochgenau unterhalb eines Werkzeugs einer Belichtungs- oder Inspektionseinheit zu positionieren. Der Wafer liegt dabei auf einem in sechs Freiheitsgraden beweglichen Tisch, der über einen entsprechenden Antrieb bewegt wird. Als Objekt, dessen Position hochgenau zu erfassen ist, fungiert hier demzufolge der Tisch; um diesen Tisch über den Antrieb und eine zugehörige Steuereinheit zu positionieren, ist die Erzeugung von Positionssignalen zur räumlichen Lage des Tisches mittels hochgenauer Positionsmesseinrichtungen erforderlich.

**[0003]** Als hochgenaue Positionsmesseinrichtungen dienen in derartigen Maschinen üblicherweise Interferometer oder aber gitterbasierte optische Positionsmesseinrichtungen. In der DE 10 2012 201 393.3 der Anmelderin wird eine Messanordnung für eine derartige Anwendung vorgeschlagen, die aus einer Kombination unterschiedlicher Positionsmesseinrichtungen besteht. So wird für die Positionsmessung entlang einer ersten, langen Hauptbewegungssachse des Objekts und zur Erfassung von Rotationsbewegungen um weitere Achsen ein Mehrachsinterferometer eingesetzt. Am Objekt ist hierbei ein Messreflektor angeordnet, der von den Messstrahlen des Mehrachsinterferometers beaufschlagt wird. Zur Positionsmessung entlang einer zweiten Hauptbewegungssachse und entlang einer dritten Achse werden gitterbasierte, interferentielle Positionsmesseinrichtungen vorgeschlagen; diese umfassen u.a. am Objekt angeordnete Maßverkörperungen in Form von Auflicht-Beugungsgittern sowie stationär demgegenüber angeordnete Reflektoren; an den Reflektoren sind weitere Beugungsgitter angeordnet, wobei die Reflektoren etwa als Durchlichtgitter-Spiegel-Einheit ausgebildet sein können. Die in den verschiedenen Positionsmesseinrichtungen eingesetzten Messreflektoren, Maßverkörperungen und Reflektoren unterliegen während der Montage und im Einsatz mechanischen sowie thermischen Belastungen und können sich hierbei auch langsam verformen. Derartige Verformungen dieser Elemente haben Messfehler bei der Positionsbestimmung zur Folge.

**[0004]** Zur Kompensation dieser Messfehler sind sog. Selbstkalibrierungsverfahren bekannt, über die im Betrieb oder in speziellen Kalibrierzyklen der jeweiligen Maschine die aktuellen Verformungen der entsprechenden Elemente, wie z.B. der Maßverkörperungen bzw. Reflektoren, messtechnisch erfasst

und korrigiert werden. Für derartige Selbstkalibrierungsverfahren ist üblicherweise erforderlich, dass entlang der jeweiligen Erstreckungsrichtung die Maßverkörperung oder der Reflektor mittels zweier oder mehrerer Abtast- bzw. Optikeinheiten abgetastet und über die beiden Optikeinheiten Positionssignale erzeugt werden. Die Positionssignale der beiden Optikeinheiten werden dann in Differenz zueinander verschaltet, so dass aus dem resultierenden Differenzsignal anschließend in bekannter Art und Weise der konkret vorliegende, verformungsbedingte Fehler der jeweiligen Maßverkörperung bzw. des Reflektors berechnet und nachfolgend kompensiert werden kann. In Bezug auf derartige Selbstkalibrierungsverfahren sei etwa auf die Veröffentlichung „Exact wavefront reconstruction from two lateral shearing interferograms“, C. Elster, I. Weingärtner in Vol. 16, No. 9, Sept 1999, J. Opt. Soc. Am. A, 2281–2285, verwiesen.

**[0005]** Pro Messrichtung bedeutet dies, dass für ein derartiges Selbstkalibrationsverfahren zwei Optikeinheiten zur Abtastung und Positionssignalerzeugung erforderlich sind. Dies stellt einen erheblichen Mehraufwand dar und hat desweiteren eine Vergrößerung des Bauvolumens des Gesamtsystems zur Folge.

**[0006]** Unabhängig von der erläuterten Selbstkalibrierungsproblematik kann es auch aus anderen Gründen erforderlich oder vorteilhaft sein, bei bestimmten Messabläufen oder Maschinenzuständen Positionen entlang einer Bewegungsrichtung redundant zu erfassen. Damit kann z.B. an bestimmten Positionen die Zahl erforderlicher sog. Abbé-Arme reduziert oder die Genauigkeit gesteigert werden.

**[0007]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Möglichkeit zur hochgenauen Positionserfassung eines beweglichen Objektes anzugeben, über die mit möglichst wenig Aufwand die Position des Objekts entlang unterschiedlicher Messrichtungen messtechnisch erfasst werden soll.

**[0008]** Diese Aufgabe wird gelöst durch eine Positionsmesseinrichtung mit den Merkmalen des Anspruches 1.

**[0009]** In Anspruch 9 ist eine Anordnung mit einer derartigen Positionsmesseinrichtung angegeben.

**[0010]** Vorteilhafte Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Lösungen finden sich in den abhängigen Ansprüchen.

**[0011]** Über die erfindungsgemäße Positionsmesseinrichtung ist eine Erfassung der Position eines ersten Objekts in Bezug auf ein zweites Objekt möglich, wobei das erste und das zweite Objekt entlang mindestens zweier Messrichtungen relativ zueinander beweglich angeordnet sind. Die Positions-

messeinrichtung umfasst eine Optikeinheit, die mit einem der beiden Objekte verbunden ist und mindestens eine Lichtquelle, eine Detektoranordnung sowie weitere optische Elemente in definierter Anordnung aufweist. Ferner ist eine Maßverkörperung-Reflektor-Einheit vorgesehen, welche am anderen Objekt angeordnet ist. Diese weist mindestens zwei unterschiedlich ausgebildete Bereiche in einer Spur auf, die zur Positionserfassung mit der Optikeinheit optisch abtastbar sind, wobei über die unterschiedliche Ausbildung der Bereiche bei der Positionserfassung eine Umschaltung zwischen den verschiedenen Messrichtungen möglich ist und für jede Messrichtung mit der Optikeinheit jeweils Positionssignale bezüglich der Relativbewegung der beiden Objekte erzeugbar sind.

**[0012]** In einer möglichen Ausführungsform sind in den unterschiedlichen Bereichen der Spur der Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit Messreflektoren und Maßverkörperungen angeordnet.

**[0013]** Hierbei können die Messreflektoren als Planspiegel und die Maßverkörperungen als Auflicht-Beugungsgitter ausgebildet sein.

**[0014]** Vorzugsweise erfahren Strahlenbündel, die auf die unterschiedlich ausgebildeten Bereiche auftreffen unterschiedliche Umlenk- und/oder Ablenkwirkungen.

**[0015]** Mit Vorteil weist die Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit mehrere parallel angeordnete Spuren auf, in denen Maßverkörperungen und/oder Messreflektoren angeordnet sind.

**[0016]** Es ist hierbei möglich, dass

- in einer Spur eine Maßverkörperung angeordnet ist und
- in einer weiteren Spur in einem ersten Bereich ein Messreflektor angeordnet ist und in einem zweiten Bereich eine Maßverkörperung angeordnet ist, die identisch zur Maßverkörperung in der anderen Spur ausgebildet ist.

**[0017]** Es kann vorgesehen werden, dass entlang der Erstreckungsrichtung der Spur ein zentraler erster Bereich in der Spur angeordnet ist und mindestens an einem Ende des ersten Bereichs ein unterschiedlich ausgebildeter zweiter Bereich in der Spur angeordnet ist.

**[0018]** Ferner ist es möglich, dass in der Spur ein erster Bereich angeordnet ist, der sich über den Großteil der Spur erstreckt und ein zweiter, unterschiedlich ausgebildeter Bereich in der Spur angeordnet ist, der sich lediglich über einen deutlich kleineren Bereich der Spur erstreckt.

**[0019]** Eine mögliche Anordnung weist eine erfundungsgemäße Positionsmesseinrichtung auf und umfasst ferner

- ein erstes Objekt, das entlang zweier orthogonaler, erster und zweiter Hauptbewegungssachsen sowie entlang einer hierzu dritten Achse beweglich angeordnet ist, wobei
  - die erste Hauptbewegungssachse als erste Messrichtung fungiert,
  - die dritte Achse als zweite Messrichtung und
  - die zweite Hauptbewegungssachse als dritte Messrichtung;
- und
- ein zweites Objekt, das stationär gegenüber dem ersten Objekt angeordnet ist, wobei die Optikeinheit am zweiten Objekt angeordnet ist

**[0020]** Hierbei ist am ersten Objekt die sich entlang der zweiten Hauptbewegungssachse erstreckende Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit angeordnet, die eine Spur mit einem ersten Bereich mit einem Messreflektor und einen zweiten Bereich mit einer Maßverkörperung umfasst, so dass bei der optischen Abtastung des ersten Bereichs Positionssignale bezüglich einer Bewegung des ersten Objekts entlang der ersten Messrichtung erzeugbar sind und bei der optischen Abtastung des zweiten Bereichs Positionssignale bezüglich einer Bewegung des ersten Objekts entlang der zweiten Messrichtung oder entlang der dritten Messrichtung erzeugbar sind.

**[0021]** Die Anordnung kann eine zweite Positionsmesseinrichtung umfassen, über die Positionssignale bezüglich einer Bewegung des ersten Objekts entlang der zweiten Messrichtung erzeugbar sind.

**[0022]** Ferner kann die Anordnung eine dritte Positionsmesseinrichtung umfassen, über die Positionssignale bezüglich einer Bewegung des ersten Objekts entlang der dritten Messrichtung erzeugbar sind.

**[0023]** Es ist damit möglich, dass im Fall der optischen Abtastung der Maßverkörperung im zweiten Bereich und der gleichzeitigen Erzeugung von Positionssignalen mittels der zweiten oder dritten Positionsmesseinrichtung während einer Verfahrbewegung entlang der ersten Messrichtung jeweils eine zweifache Abtastung eines Reflektors der zweiten oder dritten Positionsmesseinrichtung entlang der ersten Messrichtung erfolgt.

**[0024]** Hierbei kann vorgesehen werden, dass

- die Positionssignale der ersten und zweiten Positionsmesseinrichtung einer Kalibrationseinheit zuführbar sind und/oder
- die Positionssignale der ersten und dritten Positionsmesseinrichtung einer Kalibrationseinheit zuführbar sind.

**[0025]** Vorzugsweise ist die erste Positionsmesseinrichtung als Mehrachs-Interferometer mit vier Messstrahlen ausgebildet.

**[0026]** Maßgeblich an der vorliegenden Erfindung ist demzufolge, dass die Messrichtung, entlang der eine Positionserfassung mit der erfindungsgemäßen Positionsmesseinrichtung erfolgt, nunmehr nicht durch die verwendete Abtasteinheit bzw. Optikeinheit und die darin vorgesehene Abtastoptik festgelegt wird, sondern ausschließlich durch die Ausbildung bestimmter Bereiche auf Seiten der verwendeten Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit. Abhängig von der Relativposition der zueinander beweglichen Objekte bzw. von bestimmten Maschinenstellungen ist es dadurch möglich, zwischen verschiedenen Messrichtungen, entlang derer Positionsinformationen benötigt werden, definiert umzuschalten und zusätzliche Positionssignale bzgl. der Objektbewegung entlang der jeweiligen neuen Messrichtung zu erzeugen. Für die verschiedenen Messrichtungen kann jeweils die gleiche Optikeinheit bzw. Abtastoptik zur Positionssignalerzeugung eingesetzt werden. Es resultiert eine erhebliche Reduzierung des Aufwands für das Gesamtsystem sowie eine Verringerung des Bauvolumens.

**[0027]** Neben dem nachfolgend noch im Detail zu erläuternden Anwendungsfall in einer Anordnung, in der eine Selbstkalibrierung bestimmter Komponenten erforderlich ist, kann die vorliegende Erfindung selbstverständlich auch in Verbindung mit anderen Messanordnungen eingesetzt werden, bei denen eine derartige Umschaltmöglichkeit zwischen verschiedenen Messrichtungen erforderlich oder von Vorteil ist.

**[0028]** Weitere Einzelheiten und Vorteile der vorliegenden Erfindung seien anhand der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Figuren erläutert.

**[0029]** Es zeigt

**[0030]** [Fig. 1a](#) eine stark schematisierte Darstellung einer Anordnung mit einer erfindungsgemäßen Positionsmesseinrichtung in einer ersten Ansicht (zy-Ebene);

**[0031]** [Fig. 1b](#) eine stark schematisierte Darstellung der Anordnung aus [Fig. 1a](#) in einer zweiten Ansicht (xy-Ebene);

**[0032]** [Fig. 1c](#) eine Frontansicht der Optikeinheit aus der Anordnung der vorhergehenden Figuren;

**[0033]** [Fig. 1d](#) eine Draufsicht auf die Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit der Anordnung aus den vorhergehenden Figuren;

**[0034]** [Fig. 1e](#) eine Draufsicht auf die Reflektoren der Anordnung aus den vorhergehenden Figuren;

**[0035]** [Fig. 2a](#), [Fig. 2b](#) je eine schematisierte Teildarstellung der Anordnung aus den vorhergehenden Figuren in verschiedenen Messstellungen zur Erläuterung der Messrichtungsumschaltung mit einer erfindungsgemäßen Positionsmesseinrichtung.

**[0036]** In den [Fig. 1a](#), [Fig. 1b](#) ist eine Anordnung zur Erfassung der Position eines ersten Objekts **1** in sechs Freiheitsgraden stark schematisiert in verschiedenen Ansichten dargestellt. Das erste Objekt **1**, beispielsweise ein Tisch in einer Maschine zur Halbleiterfertigung oder -inspektion, ist hierbei entlang einer ersten und zweiten Hauptbewegungssachse y, x sowie entlang einer hierzu senkrechten dritten Achse z beweglich gegenüber einem zweiten Objekt **5** angeordnet, beispielsweise einem stationären Maschinenteil. Im Folgenden sei die erste Hauptbewegungssachse y auch als erste Messrichtung bezeichnet, die dritte Achse z als zweite Messrichtung und die zweite Hauptbewegungssachse x als dritte Messrichtung.

**[0037]** Neben der Erfassung der linearen Objektbewegung entlang der zwei Hauptbewegungssachsen x, y und entlang der dritten Achse z ist zur hochgenauen Positionierung des Objekts **1** ferner die messtechnische Erfassung von Rotationsbewegungen des Objekts **1** um die drei verschiedenen Achsen x, y, z erforderlich, um die Position des Objekts **1** im Raum in allen sechs Freiheitsgraden zu bestimmen. Die Rotationsbewegungen des Objekts **1** um die Achsen x, y, z werden nachfolgend als Rx-, Ry- und Rz-Bewegung bezeichnet.

**[0038]** Zur Erfassung aller sechs Freiheitsgrade des bewegbaren ersten Objektes **1** dienen mehrere Positionsmesseinrichtungen, die geeignet zu einem Gesamtsystem kombiniert werden, wie dies in der DE 10 2012 201 393.3 grundsätzlich bereits beschrieben ist; der Offenbarungsgehalt der DE 10 2012 201 393.3 sei daher ausdrücklich in die vorliegende Anmeldung einbezogen. Die Positionsmesseinrichtungen umfassen einerseits eine Optikeinheit **2** sowie Reflektoren **4.1**, **4.2**, die im vorliegenden Beispiel mit dem zweiten Objekt **5**, d.h. mit dem stationären Maschinenteil, verbunden bzw. gekoppelt sind. In der Optikeinheit **2** sind hierbei eine Lichtquelle, eine Detektoranordnung sowie weitere optische Elemente in definierter Anordnung vorgesehen, die allesamt nicht in den Figuren gezeigt sind. Alternativ zur unmittelbaren Anordnung der Lichtquelle und/oder der Detektoranordnung in der Optikeinheit **2** kann selbstverständlich auch vorgesehen sein, diese Komponenten über Lichtleiter mit der Optikeinheit **2** zu verbinden. Andererseits gehört zu den Positionsmesseinrichtungen eine nachfolgend als Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit **3** bezeichnete Bau-

einheit, die am Objekt **1** angeordnet und demzufolge entlang der verschiedenen Achsen x, y, z beweglich gegenüber den anderen Komponenten der Positionsmesseinrichtungen ist. Die Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit **3** umfasst wie aus der Draufsicht in [Fig. 1d](#) ersichtlich mehrere Spuren **3.1–3.4**, die parallel zueinander entlang der zweiten Hauptbewegungsachse x angeordnet sind. In den Spuren **3.1–3.4** sind im dargestellten Ausführungsbeispiel Maßverkörperungen und/oder Messreflektoren angeordnet, auf die die Messstrahlen  $Mx_1$ ,  $Mx_2$ ,  $My_1$ ,  $My_2$ ,  $My_3$ ,  $My_4$ ,  $Mz_1$ ,  $Mz_2$  der verschiedenen Positionsmesseinrichtungen auftreffen. Als Messreflektor können etwa Planspiegel vorgesehen werden, als Maßverkörperung ein- oder zweidimensionale Beugungsgitter (Auflicht, Durchlicht).

**[0039]** In den [Fig. 1a](#) und [Fig. 1b](#) sind lediglich stark schematisiert die maßgeblichen Messstrahlen  $Mx_1$ ,  $Mx_2$ ,  $My_1$ ,  $My_2$ ,  $My_3$ ,  $My_4$ ,  $Mz_1$ ,  $Mz_2$  der eingesetzten Positionsmesseinrichtungen angedeutet, die zur Positionserfassung bzw. Positionsbestimmung des Objekts **1** in sechs Freiheitsgraden genutzt werden; auf eine Darstellung der detaillierten Strahlengänge der einzelnen Positionsmesseinrichtungen wurde in diesen Figuren aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet. Insbesondere ist u.a. nicht ersichtlich, dass die verschiedenen Messstrahlen  $Mx_1$ ,  $Mx_2$ ,  $My_1$ ,  $My_2$ ,  $My_3$ ,  $My_4$ ,  $Mz_1$ ,  $Mz_2$  zweimal in Richtung des Objekts **1** propagieren.

**[0040]** Eine erste Positionsmesseinrichtung ist vorgesehen, um darüber primär die Position des Objekts **1** entlang der ersten Hauptbewegungsachse y bzw. entlang der ersten Messrichtung zu erfassen; ferner erfolgt darüber die Erfassung der Rotationsbewegungen Rx, Rz um die zweite Hauptbewegungsachse x und die dritte Achse z. Zu den erfindungsgemäßen Maßnahmen auf Seiten der ersten Positionsmesseinrichtung sei auf die nachfolgende Beschreibung verwiesen. Die erste Positionsmesseinrichtung ist als Mehrachs-Interferometer mit insgesamt vier Messstrahlen  $My_1$ ,  $My_2$ ,  $My_3$ ,  $My_4$  ausgebildet; in der DE 10 2012 201 393.3 war an dieser Stelle ein 3-Achs-Interferometer mit drei Messstrahlen vorgesehen.

**[0041]** In Bezug auf geeignete optische Positionsmesseinrichtungen zur Erfassung der Bewegung des Objekts **1** entlang der zweiten Messrichtung z bzw. entlang der dritten Messrichtung x sei ausdrücklich auf die bereits eingangs erwähnte DE 10 2012 201 393.3 verwiesen.

**[0042]** So ist in der vorliegenden Anordnung eine zweite Positionsmesseinrichtung vorgesehen, über die Positionssignale bezüglich einer Objektbewegung entlang der zweiten Messrichtung z erzeugbar sind. Diese Positionsmesseinrichtung entspricht im Grunde derjenigen Positionsmesseinrichtung, die in

der DE 10 2012 201 393.3 als erste Positionsmesseinrichtung bezeichnet wird. Im Unterschied hierzu sind nunmehr sind anstelle eines einzigen Messstrahls vorliegend zwei Messstrahlen  $Mz_1$ ,  $Mz_2$  vorgesehen.

**[0043]** Eine dritte Positionsmesseinrichtung dient in der dargestellten Anordnung zur Erzeugung von Positionssignalen bezüglich der Bewegung des Objekts **1** entlang der dritten Messrichtung x. Diese Positionsmesseinrichtung ist analog zu derjenigen Positionsmesseinrichtung aufgebaut, die in der DE 10 2012 201 393.3 als zweite Positionsmesseinrichtung bezeichnet wird. Im Unterschied hierzu ist vorliegend als Maßverkörperung zur Positionsbestimmung entlang der zweiten Hauptbewegungsachse x eine zweidimensionale Maßverkörperung **3.2** vorgesehen, die parallel zur Achse z am ersten Objekt **1** angeordnet ist. Die Messstrahlen der dritten Positionsmesseinrichtung sind in den Figuren mit  $Mx_1$  und  $Mx_2$  bezeichnet.

**[0044]** Im Hinblick auf die Relativanordnung der verschiedenen Messstrahlen  $Mx_1$ ,  $Mx_2$ ,  $My_1$ ,  $My_2$ ,  $My_3$ ,  $My_4$ ,  $Mz_1$ ,  $Mz_2$  der verschiedenen Positionsmesseinrichtungen sei ferner auf die [Fig. 1c](#) verwiesen. Diese zeigt eine Frontansicht der Optikeinheit **2** mit den insgesamt acht Messstrahlen  $Mx_1$ ,  $Mx_2$ ,  $My_1$ ,  $My_2$ ,  $My_3$ ,  $My_4$ ,  $Mz_1$ ,  $Mz_2$  der verschiedenen

#### Positionsmesseinrichtungen

**[0045]** Wie eingangs erwähnt, ist zur hochpräzisen Positionsbestimmung mit Hilfe einer derartigen Anordnung erforderlich, dass die hierbei verwendeten Maßverkörperungen, Messreflektoren und Reflektoren **4.1**, **4.2** der verwendeten Positionsmesseinrichtungen einer Selbstkalibration unterzogen werden. Dies erfordert, dass jede genutzte Maßverkörperung, jeder Messreflektor bzw. jeder Reflektor **4.1**, **4.2** in den Abtaststrahlengängen der eingesetzten Positionsmesseinrichtungen mittels zweier Optik- bzw. Abtasteinheiten entlang einer einzigen Abtastlinie abgetastet wird, wobei die Abtastlinie jeweils entlang der Erstreckungsrichtung der zu kalibrierenden Komponente verläuft. Hierbei sollte grundsätzlich der erforderliche Aufwand möglichst gering gehalten werden, also insbesondere keine zusätzlichen Optikeinheiten erforderlich werden. Besonders kritisch ist im Fall einer Konfiguration wie in der gezeigten Anordnung die Selbstkalibration der Beugungsgitter **4.1a**, **4.1b**, **4.2a**, **4.2b**, die an den Reflektoren **4.1**, **4.2** angeordnet sind und u.a. zur hochgenauen optischen Positionserfassung entlang der zweiten Hauptbewegungsachse x und entlang der dritten Achse z über die dritte und zweite Positionsmesseinrichtung dienen. Eine schematische Ansicht der Unterseite der Reflektoren **4.1**, **4.2** mit den darauf angeordneten Beugungsgittern **4.1a**, **4.1b**, **4.2a**, **4.2b** ist in [Fig. 1e](#) gezeigt. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel sind diese Beugungsgitter

ter **4.1a**, **4.1b**, **4.2a**, **4.2b** als Durchlicht-Beugungsgitter ausgebildet, die Oberseite der Reflektoren **4.1**, **4.2** ist mit einem Spiegel versehen, dessen reflektierende Seite in Richtung der Durchlicht-Beugungsgitter orientiert ist; die Reflektoren **4.1**, **4.2** sind demzufolge jeweils als Durchlichtgitter-Spiegel-Einheit ausgebildet. Zur gewünschten Selbstkalibration dieser Komponenten ist grundsätzlich die Zuschaltung mindestens einer zweiten Optikeinheit bzw. Abtastoptik erforderlich, um aus den erzeugten Positionssignalen der jeweiligen primären Positionsmeseinrichtungen und der Positionssignale der zusätzlichen Optikeinheiten Selbstkalibrationsdaten zu erzeugen.

**[0046]** Erfindungsgemäß ist nunmehr im dargestellten Ausführungsbeispiel vorgesehen, zu diesem Zweck diejenige Positionsmeseinrichtung geeignet zu modifizieren, die zur Positionserfassung des Objekts **1** entlang der ersten Hauptbewegungssachse **y** bzw. entlang der ersten Messrichtung sowie zur Erfassung der Rotationsbewegungen **Rx**, **Rz** um die zweite Hauptbewegungssachse **x** und die dritte Achse **z** dient, d.h. die erste Positionsmeseinrichtung. Über die nachfolgend erläuterten Maßnahmen ist es somit möglich, die erste Positionsmeseinrichtung hinsichtlich der damit erfassten Messrichtung definiert umzuschalten, um so jeweils eine zweite Positionsmessung zu Kalibrationszwecken mit Hilfe dieser Positionsmeseinrichtung vorzunehmen. Neben der Positionserfassung entlang der ersten Hauptbewegungssachse **y** bzw. entlang der ersten Messrichtung ist eine Umschaltung der ersten Positionsmesseinrichtung dahingehend möglich, dass darüber auch eine wahlweise Positionserfassung entlang anderer Messrichtungen möglich wird, nämlich entlang der zweiten Hauptbewegungssachse **x** und entlang der dritten Achse **z**.

**[0047]** Anhand der stark vereinfachten Darstellungen in den [Fig. 2a](#), [Fig. 2b](#) wird nachfolgend veranschaulicht, wie eine zweite Abtastung des Reflektors **4.1'** bzw. des darauf angeordneten Beugungsgitters **4.1b'** entlang von dessen Längserstreckungsrichtung **y** bzw. entlang der Abtastlinie **L** über die geeignet modifizierte erste Positionsmeseinrichtung erfolgen kann, um auf diese Art und Weise eine Selbstkalibration des Beugungsgitters **4.1b'** zu ermöglichen. Das Beugungsgitter **4.1b'** des Reflektors **4.1'** dient in der gezeigten Anordnung zur Erzeugung von Positionssignalen bzgl. einer Objektbewegung entlang der dritten Achse **z**; in der DE 10 2012 201 393.3 wird die hierzu genutzte Positionsmeseinrichtung als erste Positionsmeseinrichtung bezeichnet, in Bezug auf den konkreten Abtaststrahlengang dieser Positionsmeseinrichtung sei ausdrücklich auf die DE 10 2012 201 393.3 verwiesen. Vorliegend ist hierbei von der zweiten Positionsmeseinrichtung die Rede.

**[0048]** Es ist nunmehr erfindungsgemäß vorgesehen, in der Spur **3.4'** der Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit **30'**, die primär zur Positionserfassung entlang der ersten Hauptbewegungssachse **y** dient, mehrere Bereiche **3.4a'**, **3.4b'** bzw. Abschnitte unterschiedlich auszubilden. Ein erster Bereich **3.4a'** ist hierbei als Messreflektor in Form eines Planspiegels ausgebildet und dient zur interferometrischen Positionserfassung entlang der ersten Hauptbewegungssachse **y**. Entscheidend für die gewünschte Messrichtungs-Umschaltbarkeit ist nunmehr die hiervon unterschiedliche Ausbildung mindestens eines zweiten Bereichs **3.4b'** in dieser Spur, nämlich als Maßverkörperung in Form eines Auflicht-Beugungsgitters. Die Maßverkörperung ist in diesem zweiten Bereich **3.4b'** identisch zu derjenigen Maßverkörperung ausgebildet, die in einer weiteren Spur **3.2'** auf der Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit **30'** angeordnet ist und vom Messstrahl **Mz** der zweiten Positionsmesseinrichtung für die **z**-Achsen-Bewegung beaufschlagt wird.

**[0049]** Eine derartige Ausbildung der Bereiche **3.4a'**, **3.4b'** in der Spur **3.4** ermöglicht nunmehr die erfindungsgemäße Umschaltung der Messrichtungen der ersten Positionsmeseinrichtung, wie dies in den [Fig. 2a](#), [Fig. 2b](#) veranschaulicht wird.

**[0050]** In der Mess- bzw. Maschinenstellung gemäß [Fig. 2a](#) befindet sich das Objekt und damit die Maßverkörperungs-Reflektoreinheit **30'** entlang der zweiten Hauptbewegungssachse **x** in einer Position, in der der Messstrahl **My** der ersten Positionsmeseinrichtung auf den Bereich **3.4a'** trifft, d.h. auf den beispielsweise als Planspiegel ausgebildeten Messreflektor. Von dort wird der Messstrahl **My** in Richtung der – nicht dargestellten Optikeinheit zurückreflektiert. In dieser Messstellung arbeitet die erste Positionsmeseinrichtung in bekannter Art und Weise und dient u.a. zur Erfassung der Objekt-Position entlang der ersten Hauptbewegungssachse **y**. Der in [Fig. 2a](#) ebenfalls dargestellte Messstrahl **Mz** der zweiten Positionsmeseinrichtung beaufschlagt in dieser Position die Spur **3.2'** mit der dort angeordneten Maßverkörperung sowie das Beugungsgitter des Reflektors **4.1'**. Über die zugehörige zweite Positionsmeseinrichtung ist die Erfassung der Objektposition entlang der zweiten Messrichtung bzw. der dritten Achse **z** möglich.

**[0051]** Verfährt das Objekt bzw. die Maßverkörperungs-Reflektoreinheit **30'** entlang der zweiten Hauptbewegungssachse **x** nunmehr in die Selbstkalibrations-Position für die dritte Achse **z**, wie dies in [Fig. 2b](#) gezeigt ist, so trifft der Messstrahl **My** der ersten Positionsmeseinrichtung dann auf den zweiten Bereich **3.4b'** in der entsprechenden Spur **3.4'**. Wie ersichtlich, bewirkt die dort angeordnete Maßverkörperung eine Umlenkung des Messstrahls **My** analog zur Umlenkung des Messstrahls **Mz** der zwei-

ten Positionsmesseinrichtung in Richtung des zu kalibrierenden Beugungsgitters **4.1b'** auf dem Reflektor **4.1'**. Das Beugungsgitter **4.1b'** auf dem Reflektor **4.1'** wird bei einer resultierenden Objektbewegung entlang der ersten Hauptbewegungsrichtung y nunmehr entlang der Abtastlinie L zweifach abgetastet, d.h. entlang der ersten Hauptbewegungsachse y bzw. entlang der ersten Messrichtung. Eine Selbstkalibration des Beugungsgitters **4.1b'** auf dem Reflektor **4.1'** ist somit möglich, ohne dass hierzu eine zusätzliche Optik- bzw. Abtasteinheit erforderlich ist. Die erste Positionsmesseinrichtung, die eigentlich primär für die Positionserfassung entlang der ersten Messrichtung respektive der ersten Hauptbewegungsachse y dient, kann in dieser Position derart umgeschaltet werden, dass darüber auch eine Positionserfassung entlang einer anderen Messrichtung, nämlich entlang der dritten Achse z, möglich ist. Zusammen mit den verfügbaren Positionssignalen der für diese Achse z vorgesehenen zweiten Positionsmesseinrichtung ist eine Selbstkalibration der Reflektoren **4.1'** entlang ihrer Längserstreckungsrichtung möglich, die der ersten Hauptbewegungsachse y entspricht. Während der Verfahrbewegung entlang der ersten Hauptbewegungsachse y werden die erzeugten Positionssignale der ersten und zweiten Positionsmesseinrichtung einer geeigneten – nicht gezeigten – Kalibrationseinheit zugeführt.

**[0052]** Basierend auf diesem Prinzip können neben den Beugungsgittern **4.1b**, **4.2b** auch die Beugungsgitter **4.1a**, **4.2a** auf den Reflektoren **4.1**, **4.2** der Anordnung aus den [Fig. 1a–Fig. 1e](#) einer Selbstkalibration entlang der ersten Hauptbewegungsrichtung y unterzogen werden. Die Beugungsgitter **4.1a**, **4.2a** sind in der dritten Positionsmesseinrichtung der vorliegenden Anordnung vorgesehen, über die eine Positionserfassung des Objekts **1** entlang der zweiten Hauptbewegungsachse x erfolgt. Im Hinblick auf den Abtaststrahlengang dieser Positionsmesseinrichtung sei wieder ausdrücklich auf die DE 10 2012 201 393.3, wo diese Positionsmesseinrichtung als zweite Positionsmesseinrichtung bezeichnet wird. Um die erste Positionsmesseinrichtung zur Erfassung der Objektbewegung entlang der ersten Hauptbewegungsachse y auch in diese Messrichtung umzuschalten, umfasst die Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit **3** eine weitere Spur **3.1** mit unterschiedlich ausgebildeten Bereichen **3.1a**, **3.1b**, wie dies aus [Fig. 1d](#) ersichtlich ist. Während der Bereich **3.1a** als Messreflektor für die Positionserfassung der ersten Positionsmesseinrichtung entlang der ersten Hauptbewegungsachse y ausgebildet ist, sind die Bereiche **3.1b** mit einer Maßverkörperung versehen, um in diesen Positionen jeweils eine Ab- bzw. Umlenkung des darauf einfallenden Messstrahls in Richtung der Beugungsgitter **4.1a**, **4.2a** auf den Reflektoren **4.1**, **4.2** zu bewirken und darüber eine zweite Abtastung derselben zu ermöglichen, wenn in dieser Stellung eine Objektbe-

wegung entlang der ersten Hauptbewegungsachse y erfolgt. In diesem Fall werden die Positionssignale der umgeschalteten ersten Positionsmesseinrichtung und der dritten Positionsmesseinrichtung einer wiederum nicht dargestellten Kalibrationseinheit zugeführt.

**[0053]** Über die erfindungsgemäßen Maßnahmen ist somit in der beschriebenen Anordnung eine Selbstkalibration von bestimmten Komponenten möglich, ohne dass hierbei zusätzlicher Aufwand auf Seiten der Optik- bzw. Abtasteinheit **2** der eingesetzten Positionsmesseinrichtungen erforderlich ist. Möglich wird dies durch die gezielte Umschaltung der Messrichtung in einer der verwendeten Positionsmesseinrichtungen, im vorliegenden Fall der ersten Positionsmesseinrichtung. Diese kann somit in bestimmten Maschinenstellungen bzw. Kalibrationspositionen für die zur Selbstkalibration erforderliche zweite optische Abtastung der entsprechenden Komponenten und zur Erzeugung entsprechender Positionssignale herangezogen werden.

**[0054]** Wie oben erwähnt, ist die erfindungsgemäß ausgebildete erste Positionsmesseinrichtung in der erläuterten Anordnung als 4-Achs-Interferometer ausgebildet. Darüber ist gewährleistet, dass etwa auch während der erfolgenden Selbstkalibration der Reflektoren entlang der ersten Hauptbewegungsachse y, z.B. mittels eines entsprechend umgelenkten Messstrahls  $M_{y_1}$ , eine Bestimmung der Position und Orientierung des Objekts über die drei anderen Messstrahlen  $M_{y_2}$ ,  $M_{y_3}$  und  $M_{y_4}$  möglich ist.

**[0055]** Die gewünschte Messrichtung, entlang der eine Abtastung bzw. Positionserfassung erfolgen soll, wird erfindungsgemäß ausschließlich durch geeignete Modifikationen auf Seiten der Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit **3** eingestellt; eine Draufsicht auf diese ist in [Fig. 1d](#) gezeigt. Auf Seiten der Optikeinheit **2** der ersten Positionsmesseinrichtung sind keine Änderungen erforderlich. In den erfindungsgemäß unterschiedlich ausgebildeten Bereichen **3.4a**, **3.4b** bzw. **3.1a**, **3.1b** in den Spuren **3.1**, **3.4** der Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit **3** erfahren die darauf einfallenden Strahlenbündel der entsprechenden Messstrahlen jeweils unterschiedliche Umlenk- und/oder Ablenkwickungen. Als vorteilhaft erweist sich, wenn ein erster Bereich **3.1a**, **3.4a**, der zur Erzeugung der primären Positionssignale der jeweiligen Positionsmesseinrichtung dient, sich über einen Großteil der Spur **3.1**, **3.4** erstreckt und der zweite, unterschiedlich ausgebildete Bereich **3.1b**, **3.4b**, der zur Positionssignalzeugung im umgeschalteten Betrieb dient, sich lediglich über einen deutlich kleineren Bereich der Spur **3.1**, **3.4** erstreckt. So kann wie im obigen Ausführungsbeispiel vorgesehen, der erste Bereich **3.1a**, **3.4a** zentral in der Spur **3.1**, **3.4** angeordnet werden, und lediglich an mindestens einem Ende ein unterschiedlich ausgebildeter zweiter

Bereich **3.1b, 3.4b** vorgesehen werden, wie dies im dargestellten Ausführungsbeispiel der Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit **3** in [\*\*Fig. 1d\*\*](#) realisiert ist.

**[0056]** Eine derartige Messrichtungs-Umschaltung, basierend auf den erfindungsgemäßen Überlegungen, kann auch in anderen Anwendungsfällen unabhängig von der diskutierten Selbstkalibrierung zum Einsatz kommen. Beispielsweise kann es vorteilhaft sein, an einer bestimmten Position eines Tisches eine einzelne Messrichtung besonders genau oder aber mit verringertem Abbé-Abstand zu erfassen, um beispielsweise eine Referenzmarke anzutasten. Durch Umschalten einer redundanten Messachse von einer anderen, im sonstigen Betrieb genutzten Messrichtung in die besonders genau zu erfassende Messrichtung lassen sich Positionen entlang dieser Messachse redundant und damit genauer messen.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- DE 102012201393 [[0003](#), [0038](#), [0038](#), [0040](#),  
[0041](#), [0042](#), [0043](#), [0047](#), [0047](#), [0052](#)]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- „Exact wavefront reconstruction from two lateral shearing interferograms“, C. Elster, I. Weingärtner in Vol. 16, No. 9, Sept 1999, J. Opt. Soc. Am. A, 2281–2285 [[0004](#)]

## Patentansprüche

1. Positionsmesseinrichtung zur Erfassung der Position eines ersten Objekts (1) in Bezug auf ein zweites Objekt (5), wobei das erste und das zweite Objekt entlang mindestens zweier Messrichtungen (x, y, z) relativ zueinander beweglich angeordnet sind, mit – einer Optikeinheit (2), die mit einem der beiden Objekte (5) verbunden ist und mindestens eine Lichtquelle, eine Detektoranordnung sowie weitere optische Elemente in definierter Anordnung umfasst und – einer Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit (3, 30'), welche am anderen Objekt (1) angeordnet ist und mindestens zwei unterschiedlich ausgebildete Bereiche (3.1a, 3.1b, 3.4a, 3.4b, 3.4a', 3.4b') in einer Spur (3.1, 3.4, 3.4') aufweist, die zur Positionserfassung mit der Optikeinheit (2) optisch abtastbar sind, wobei über die unterschiedliche Ausbildung der Bereiche (3.1a, 3.1b, 3.4a, 3.4b, 3.4a', 3.4b') bei der Positionserfassung eine Umschaltung zwischen den verschiedenen Messrichtungen (x, y, z) möglich ist und für jede Messrichtung (x, y, z) mit der Optikeinheit (2) jeweils Positionssignale bezüglich der Relativbewegung der beiden Objekte (1, 5) erzeugbar sind.

2. Positionsmesseinrichtung nach Anspruch 1, wobei in den unterschiedlichen Bereichen (3.1a, 3.1b, 3.4a, 3.4b, 3.4a', 3.4b') der Spur (3.1, 3.4, 3.4') der Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit (3, 30') Messreflektoren und Maßverkörperungen angeordnet sind.

3. Positionsmesseinrichtung nach Anspruch 2, wobei die Messreflektoren als Planspiegel und die Maßverkörperungen als Auflicht-Beugungsgitter ausgebildet sind.

4. Positionsmesseinrichtung nach Anspruch 2, wobei Strahlenbündel, die auf die unterschiedlich ausgebildeten Bereiche (3.1a, 3.1b, 3.4a, 3.4b, 3.4a', 3.4b') auftreffen unterschiedliche Umlenk- und/oder Ablenkwirkungen erfahren.

5. Positionsmesseinrichtung nach Anspruch 1, wobei die Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit (3, 30') mehrere parallel angeordnete Spuren (3.1–3.4, 3.1'–3.4') aufweist, in denen Maßverkörperungen und/oder Messreflektoren angeordnet sind.

6. Positionsmesseinrichtung nach Anspruch 5, wobei – in einer Spur (3.2, 3.3, 3.2') eine Maßverkörperung angeordnet ist und – in einer weiteren Spur (3.1, 3.4, 3.4') in einem ersten Bereich (3.1a, 3.4a, 3.4a') ein Messreflektor angeordnet ist und in einem zweiten Bereich (3.1b, 3.4b, 3.4b') eine Maßverkörperung angeordnet ist, die identisch zur Maßverkörperung in der anderen Spur (3.2, 3.3, 3.2') ausgebildet ist.

7. Positionsmesseinrichtung nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei entlang der Erstreckungsrichtung der Spur (3.1, 3.4, 3.4') ein zentraler erster Bereich (3.1a, 3.4a, 3.4a') in der Spur (3.1, 3.4, 3.4') angeordnet ist und mindestens an einem Ende des ersten Bereichs ein unterschiedlich ausgebildeter zweiter Bereich (3.1b, 3.4b, 3.4b') in der Spur (3.1, 3.4, 3.4') angeordnet ist.

8. Positionsmesseinrichtung nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in der Spur (3.1, 3.4, 3.4') ein erster Bereich (3.1a, 3.4a, 3.4a') angeordnet ist, der sich über den Großteil der Spur (3.1, 3.4, 3.4') erstreckt und ein zweiter, unterschiedlich ausgebildeter Bereich (3.1b, 3.4b, 3.4b') in der Spur (3.1, 3.4, 3.4') angeordnet ist, der sich lediglich über einen deutlich kleineren Bereich der Spur (3.1, 3.4, 3.4') erstreckt.

9. Anordnung mit einer ersten Positionsmesseinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche und mit

- einem ersten Objekt (1), das entlang zweier orthogonaler, erster und zweiter Hauptbewegungssachsen (y, x) sowie entlang einer hierzu dritten Achse (z) beweglich angeordnet ist, wobei
  - die erste Hauptbewegungssachse (y) als erste Messrichtung fungiert,
  - die dritte Achse (z) als zweite Messrichtung und
  - die zweite Hauptbewegungssachse (x) als dritte Messrichtung
- einem zweiten Objekt (5), das stationär gegenüber dem ersten Objekt angeordnet ist, wobei die Optikeinheit (2) am zweiten Objekt (5) angeordnet ist und wobei
  - am ersten Objekt (1) die sich entlang der zweiten Hauptbewegungssachse (x) erstreckende Maßverkörperungs-Reflektor-Einheit (3) angeordnet ist, die eine Spur (3.1, 3.4) mit einem ersten Bereich (3.1a, 3.4a) mit einem Messreflektor und einen zweiten Bereich (3.1b, 3.4b) mit einer Maßverkörperung umfasst, so dass bei der optischen Abtastung des ersten Bereichs (3.1a, 3.4a) Positionssignale bezüglich einer Bewegung des ersten Objekts (1) entlang der ersten Messrichtung (y) erzeugbar sind und bei der optischen Abtastung des zweiten Bereichs (3.1b, 3.4b) weitere Positionssignale bezüglich einer Bewegung des ersten Objekts (1) entlang der zweiten Messrichtung (x) oder entlang der dritten Messrichtung (z) erzeugbar sind.

10. Anordnung nach Anspruch 9, die eine zweite Positionsmesseinrichtung umfasst, über die Positionssignale bezüglich einer Bewegung des ersten Objekts (1) entlang der zweiten Messrichtung (z) erzeugbar sind.

11. Anordnung nach Anspruch 9, die eine dritte Positionsmesseinrichtung umfasst, über die Positionssi-

gnale bezüglich einer Bewegung des ersten Objekts  
**(1)** entlang der dritten Messrichtung (x) erzeugbar sind.

12. Anordnung nach Anspruch 10 oder 11, wobei im Fall der optischen Abtastung der Maßverkörperung im zweiten Bereich und der gleichzeitigen Erzeugung von Positionssignalen mittels der zweiten oder dritten Positionsmeßeinrichtung während einer Verfahrbewegung entlang der ersten Messrichtung (y) jeweils eine zweifache Abtastung eines Reflektors **(4.1, 4.2)** der zweiten oder dritten Positionsmeßeinrichtung entlang der ersten Messrichtung (y) erfolgt.

13. Anordnung nach Anspruch 12, wobei  
– die Positionssignale der ersten und zweiten Positionsmeßeinrichtung einer Kalibrationseinheit zuführbar sind  
und/oder  
– die Positionssignale der ersten und dritten Positionsmeßeinrichtung einer Kalibrationseinheit zuführbar sind.

14. Anordnung nach Anspruch 9, wobei die erste Positionsmeßeinrichtung als Mehrachs-Interferometer mit vier Messstrahlen ( $My_1, My_2, My_3, My_4$ ) ausgebildet ist.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

FIG. 1a

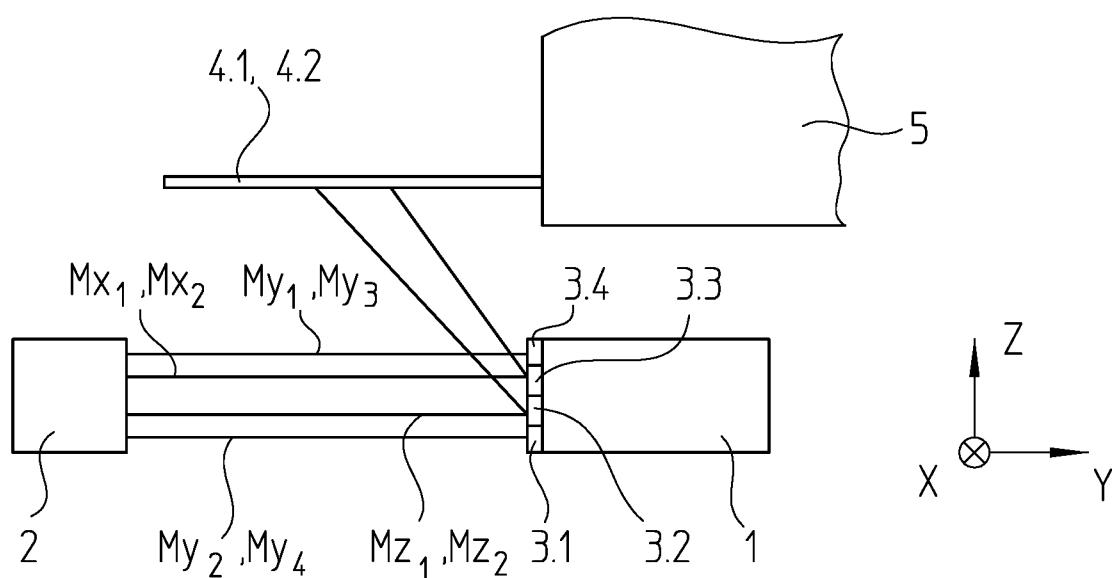


FIG. 1b

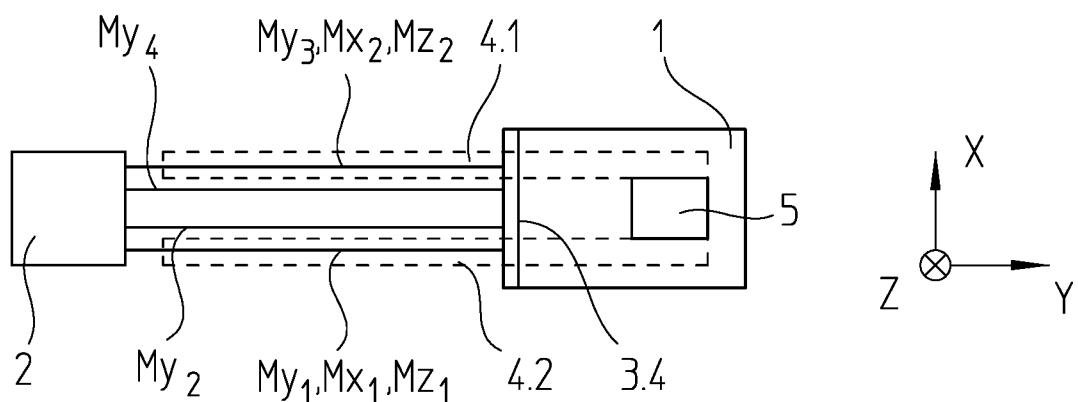


FIG. 1c

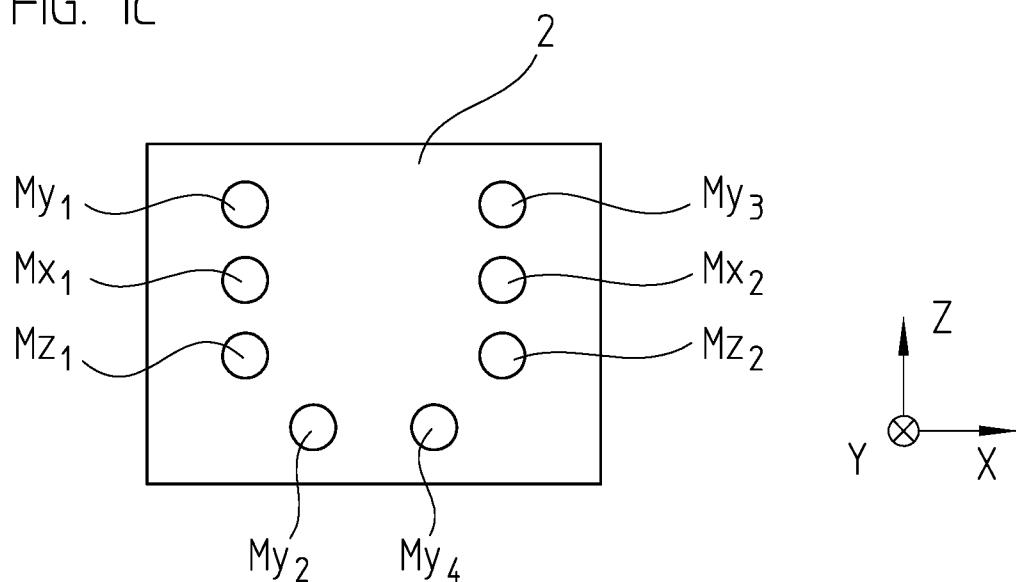


FIG. 1d

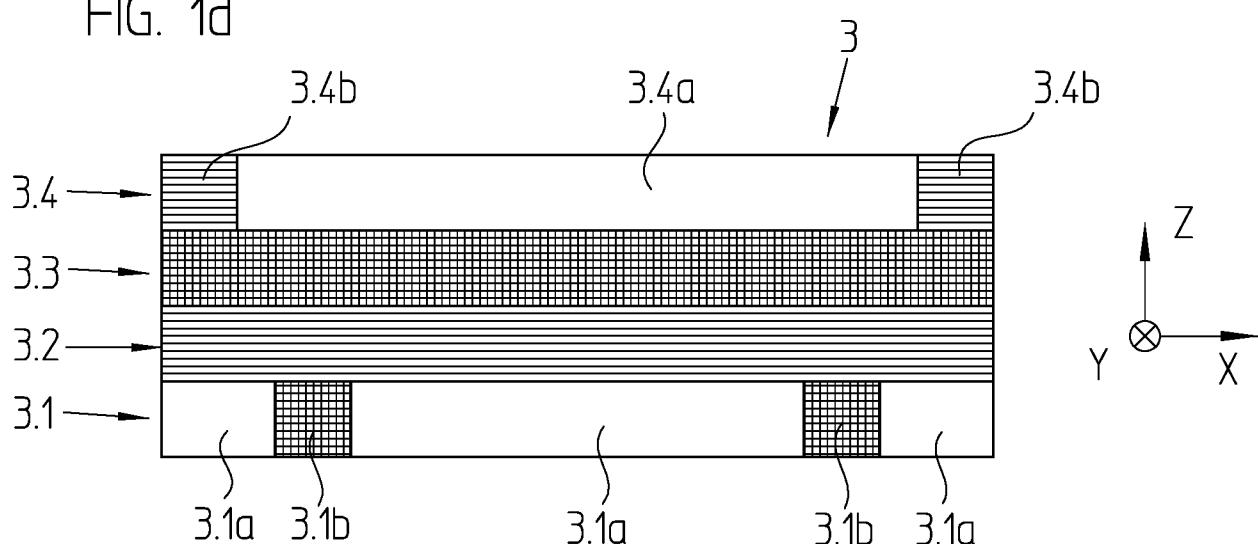


FIG. 1e

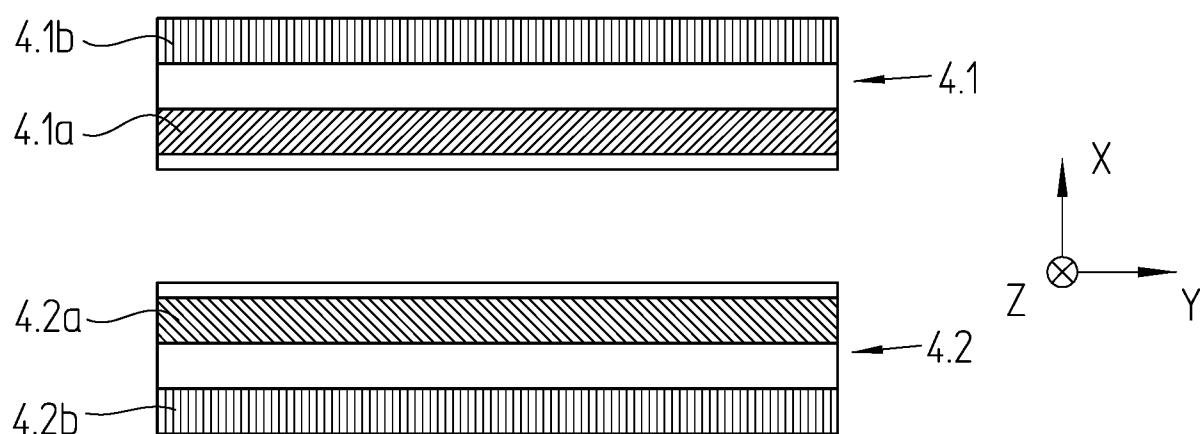


FIG. 2a

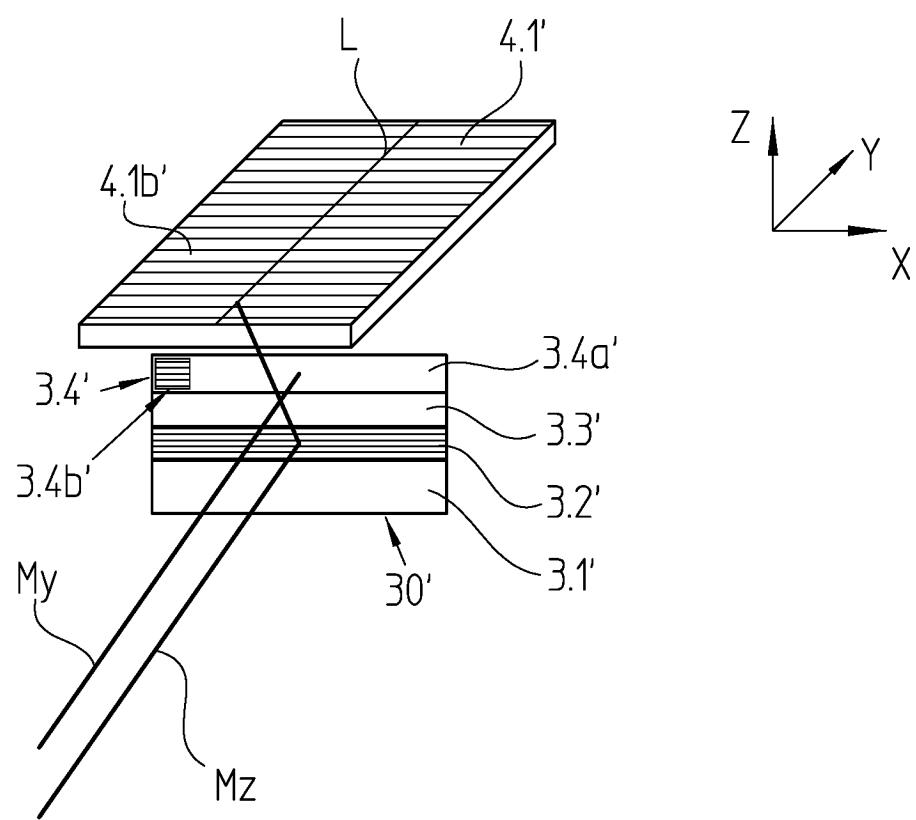


FIG. 2b

