



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 118 533.2**
 (22) Anmeldetag: **14.07.2020**
 (43) Offenlegungstag: **20.01.2022**

(51) Int Cl.: **G01Q 20/02 (2010.01)**
G01Q 30/02 (2010.01)
G02B 21/24 (2006.01)
G02B 27/10 (2006.01)
G02B 21/02 (2006.01)
G02B 21/00 (2006.01)
B82Y 35/00 (2011.01)
G01B 9/04 (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**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

| | | |
|----|------------------|----|
| DE | 42 33 399 | A1 |
| US | 7 692 138 | B1 |
| US | 2008 / 0 266 575 | A1 |
| US | 2011 / 0 007 324 | A1 |
| US | 5 756 997 | A |

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

**M. Schnell, P. S. Carney, and R. Hillenbrand,
 "Dynamic surface profiling with synthetic
 holographic confocal microscopy," in Frontiers in
 Optics 2016, OSA Technical Digest (online)
 (Optical Society of America, 2016), paper
 JTh2A.78.**

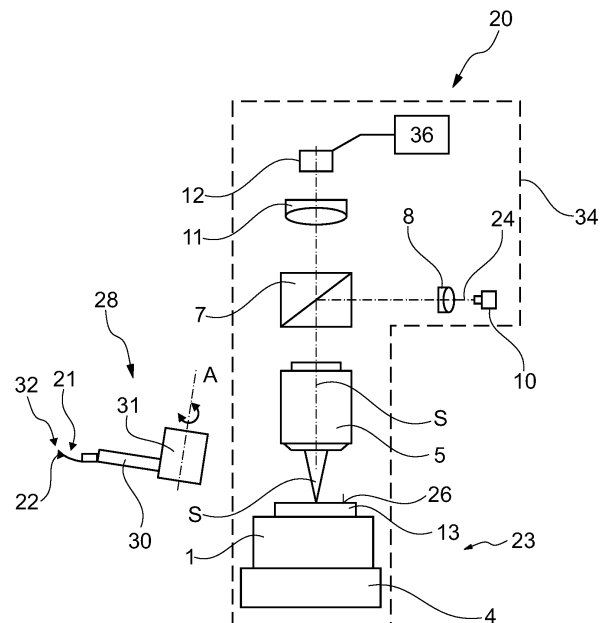
(72) Erfinder:
Dai, Gaoliang, Dr., 38116 Braunschweig, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Mikroskop**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Mikroskop (20) mit (a) einer Lichtmikroskopeinheit (34), die (i) eine Probenaufnahme (23) zum Aufnehmen einer Probe (13), (ii) eine Lichtquelle (10), (iii) ein Objektiv (5) zum Leiten von Licht (24) der Lichtquelle (10) in einem Strahlengang (S) auf die Probe (13) und (iv) einen optischen Flächendetektor (12) zum Aufnehmen eines Bildes der Probe (13) im Sichtfeld (s) des Flächendetektors (12) aufweist. Erfindungsgemäß ist (b) eine Rastersondeneinheit (28) vorgesehen, (i) die mindestens einen Cantilever (21) mit einer Messspitze (22) zum Rastern einer Probenoberfläche (26) der Probe (13) und (ii) mindestens einen Cantilever-Antrieb (30) zum Bewegen des Cantilevers (21) aufweist, (iii) wobei der Cantilever (21) in eine Ruhelage, in der der Cantilever (21) nicht im Strahlengang (S) ist, und in eine Messlage, in der ein Cantileverkopf des Cantilevers (21) im Strahlengang (S) ist, bringbar ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Mikroskop mit einer Lichtmikroskopeinheit, die eine Probenaufnahme zum Aufnehmen einer Probe, eine Lichtquelle, ein Objektiv zum Leiten von Licht der Lichtquelle in einem Strahlengang auf die Probe und einen optischen Flächendetektor zum Aufnehmen eines Bildes der Probe im Sichtfeld des Flächendetektors aufweist.

[0002] Derartige Mikroskope sind bekannt und werden zur Untersuchung beispielsweise der Oberflächenstruktur von Proben verwendet. Optische Mikroskope sind die am weitesten verbreitete Art von Mikroskopen und erlauben eine schnelle kontaktfreie Vermessung der Oberfläche der Probe. Üblicherweise liefern optische Mikroskope ein zweidimensionales Bild der Probe. Es sind jedoch auch optische Mikroskope bekannt, die die 3-D-Struktur der Probe auflösen. Die Lichtmikroskopeinheiten derartiger Mikroskope bilden, was eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung darstellt, ein Michelson-, Mirau-, oder Linnik-Interferenzmikroskop. Bei derartigen Interferenz-Mikroskopen wird das Licht der Lichtquelle in zwei Strahlen aufgespalten, nämlich einen Messstrahl und einen Referenzstrahl. Die beiden Strahlen interferieren miteinander und bilden ein Interferenzmuster, aus dem die Topographie der Oberfläche der Probe rekonstruiert wird.

[0003] In einer typischen Konfiguration wird der Messstrahl dazu von der Oberfläche der Probe reflektiert und interferiert mit dem Referenzstrahl, der von einem Referenzspiegel reflektiert wurde. Auf diese Art und Weise wird das Interferogramm erzeugt.

[0004] Die Lichtmikroskopeinheit kann auch als Konfokal-Mikroskop ausgebildet sein und umfasst dann vorzugsweise eine Blende, die in der zugeordneten Fokusebene vor einem Punktsensor angeordnet ist. Diese Blende entfernt das Licht, das vor oder hinter der Fokusebene verläuft, wohingegen das Licht aus der Fokusebene mit maximaler Intensität detektiert wird.

[0005] Optischen Mikroskopen ist eine Auflösungsgrenze gemein, die sich nach Rayleigh ergibt zu

$$R_{\text{rayleigh}} = 0.61 \lambda / NA, \quad \text{Formel (1)}$$

wobei λ die Wellenlänge des Mikroskops ist und NA die numerische Apertur.

[0006] Bekannt sind zudem Rasterkraftmikroskope, mit denen hohe Ortsauflösungen erreicht werden können. Nachteilig an Rasterkraftmikroskopen ist die geringe Messgeschwindigkeit.

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das Vermessen von Oberflächen zu verbessern.

[0008] Die Erfindung löst das Problem durch ein gattungsgemäßes Mikroskop, das eine Rastersondeneinheit aufweist, die (i) mindestens einen Cantilever mit einer Messspitze zum Rastern einer Probenoberfläche der Probe und (ii) mindestens einen Cantilever-Antrieb zum Bewegen des Cantilevers aufweist, wobei (iii) der Cantilever in eine Ruhelage, in der der Cantilever nicht im Strahlengang ist, und in eine Messlage, in der Cantileverkopf des Cantilevers im Strahlengang ist, bringbar ist.

[0009] Vorteilhaft an einem derartigen Mikroskop ist, dass sowohl die hohe Messgeschwindigkeit der Lichtmikroskopeinheit als auch die hohe Ortsauflösung der Rastersondeneinheit, bei der es sich vorzugsweise um eine Rastersondenkrafteinheit handelt, genutzt werden kann.

[0010] Vorteilhaft ist zudem, dass die Lichtmikroskopeinheit zum Bestimmen der Position des Cantilevers verwendet werden kann. Dies bedeutet, dass ansonsten notwendige Vorrichtungen zum Auswerten einer Bewegung des Cantilevers entbehrlich sind, was in der Regel die Komplexität des Mikroskops und damit den Aufwand bei der Herstellung vermindert.

[0011] Bei bekannten Rasterkraftmikroskopen ist der Sensor zum Erfassen der Deformation des Cantilevers eine Schlüsselkomponente. Die Lichtmikroskopeinheit ist vorzugsweise dazu ausgebildet, die Position des Cantileverkopfs zu detektieren, sodass ein gesonderter Sensor dafür entbehrlich ist. Die optische Detektion der Position des Cantileverkopfs ist vergleichsweise aufwändig, sodass die optische Detektion im Vergleich beispielsweise zu einer Erfassung mittels einer Piezosensors bislang als zu aufwändig angesehen wurde. Allein die Tatsache, dass die Lichtmikroskopeinheit zudem zum lichtmikroskopischen Erfassen der Probenoberfläche der Probe eingesetzt werden kann, rechtfertigt beim erfindungsgemäßen Mikroskop den Einsatz zum Erfassen der Position des Cantileverkopfs.

[0012] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter der Probenaufnahme insbesondere eine Vorrichtung verstanden, mittels der die Probe in eine geometrisch bestimmte Lage bringbar ist.

[0013] Bei der Lichtquelle kann es sich um eine monochromatische, eine multi-chromatische oder eine Weißlichtquelle handeln.

[0014] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die Rastersondeneinheit so ausgebildet, dass ein Cantileverkopf des Cantilevers im Sichtfeld des Flächendetektors angeordnet ist, wenn der Cantilever in

der Messlage ist. In anderen Worten kann der Flächendetektor ein Bild des Cantileverkopfs aufnehmen, wenn der Cantilever in der Messlage ist. Die Lichtmikroskopeinheit ist vorzugsweise ausgebildet zum Detektieren einer Auslenkung des Cantilevers mittels des optischen Flächendetektors. Wenn die Lichtmikroskopeinheit, wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen, ein Interferometer bildet, ist die Auslenkung des Cantilevers mit interferometrischer Genauigkeit bestimmbar.

[0015] Die Lichtmikroskopeinheit ist vorzugsweise ausgebildet zum zeitabhängigen Detektieren der Auslenkung. In anderen Worten misst die Lichtmikroskopeinheit die Auslenkung in Abhängigkeit von der Zeit. Auf diese Weise kann, wenn der Cantilever schwingt, eine Schwingfrequenz des Cantilevers bestimmt werden. Aus einer Verstimmung des Schwingfrequenz des Cantilevers gegenüber einer Anregungsfrequenz, mit der ein optional vorhandener Cantilever-Antrieb den Cantilever zum Schwingen anregt, kann darauf geschlossen werden, ob der Cantilever bereits in Teil-Kontakt mit der Probenoberfläche ist.

[0016] Vorzugsweise ist die Rastersondeneinheit ausgebildet zum Bewegen des Cantilevers aus der Ruhelage in die Messlage. Besonders günstig ist es, wenn dies ein geführtes Bewegen ist. Diese Bewegung kann motorisch oder manuell erfolgen. Beispielsweise besitzt das Mikroskop eine Cantilever-Bewegungsvorrichtung zum automatischen Bewegen des Cantilevers aus der Ruhelage in die Messlage und/oder umgekehrt. Beispielsweise kann es sich dabei um einen Schwenkmotor oder um einen Linearmotor handeln.

[0017] Die Rastersondeneinheit besitzt vorzugsweise einen Cantilever-Antrieb zum Bewegen des Cantileverkopfs relativ zu einer Cantilever-Aufnahme. Beispielsweise ist der Cantilever-Antrieb ausgebildet zum Anregen des Cantileverkopfs mit einer mechanischen Schwingung mit einer Anregungsfrequenz.

[0018] Günstig ist es, wenn die Lichtmikroskopeinheit ausgebildet ist zum dreidimensionalen topographischen Vermessen der Probenoberfläche, wenn der Cantilever sich in der Ruhelage befindet. Dazu bildet die Lichtmikroskopeinheit vorzugsweise ein 2D-Interferometer, mittels dem ein 3D-Bild der Probenoberfläche aufgenommen werden kann. Auf diese Weise kann die Probenoberfläche mit hoher Genauigkeit schnell vermessen werden. Allerdings erreicht die Messunsicherheit in der Regel nicht die Messunsicherheit, die mit der Rastersondeneinheit erreichbar ist.

[0019] Vorzugsweise besitzt das Mikroskop eine Auswerteeinheit, die ausgebildet zum automatischen

Berechnen einer Probenoberflächentopographie der Probe aus Messdaten der Lichtmikroskopeinheit, die ein 2D-Interferometer bildet.

[0020] Vorzugsweise ist die Auswerteeinheit zudem ausgebildet zum automatischen Vergleichen der so berechneten Probenoberflächentopographie mit Messdaten der Rastersondeneinheit und zum Korrigieren der errechneten Probenoberflächentopographie anhand der Messdaten der Rastersondeneinheit. Das kann beispielsweise dadurch geschehen, dass Bereiche der Probenoberfläche, die mittels der Lichtmikroskopeinheit nicht vermessen werden können, mit der Rastersondeneinheit vermessen werden.

[0021] Vorzugsweise ist die Lichtmikroskopeinheit ausgebildet zum Berechnen einer Durchbiegung oder einer Torsion des Cantilevers aus der Messlage aus einem Interferenzmuster, das aus Licht entsteht, das von dem Cantilever, insbesondere dem Cantileverkopf, reflektiert wurde. Das Erfassen und das Berechnen der Durchbiegung und/oder der Torsion erfolgt vorzugsweise zeitabhängig. Vorzugsweise erfolgt das Berechnen der Durchbiegung und/oder der Torsion anhand von Messdaten des Flächendetektors. Es ist aber auch möglich, dass die Lichtmikroskopeinheit weitere Sensoren, beispielsweise zumindest einen Punktsensor, aufweist, mittels dem die Durchbiegung und/oder die Torsion berechnet werden.

[0022] Besonders günstig ist es, wenn die Durchbiegung und/oder die Torsion aus dem zeitlichen Verlauf des Interferenzmusters bestimmt werden. Ändert sich die Position des Cantileverkopfs, so ändert sich, wenn die Lichtmikroskopeinheit als Interferometer ausgebildet ist, das Interferenzmuster zeitabhängig. Aus der zeitabhängigen Änderung des Interferenzmusters kann auf die zeitabhängige Änderung der Position des Cantileverkopfs geschlossen werden. So kommt es zu einer Drehung des Interferenzmusters relativ zum Flächendetektor, wenn der Cantileverkopf eine Torsionsbewegung ausführt.

[0023] Vorzugsweise besitzt die Rastersondeneinheit zumindest einen zweiten Cantilever. Dieser zumindest eine zweite Cantilever ist vorzugsweise so angeordnet, dass ein zweiter Cantileverkopf des zweiten Cantilevers im Sichtfeld des Flächendetektors angeordnet ist, wenn der zumindest eine zweite Cantilever in der Messlage ist. In anderen Worten ist es möglich, dass drei, vier, fünf oder mehr Cantilever vorhanden sind, die allesamt im Sichtfeld des Flächendetektors sind, wenn sie die jeweiligen Cantilever in ihrer Messlage sind.

[0024] Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass die einzelnen Cantilever unabhängig voneinander, ins-

besondere geführt, aus der Ruhelage in die Messlage und zurück bewegbar sind. Es ist insbesondere auch möglich, dass die Cantilever kollektiv bewegbar sind. Beispielsweise sind alle Cantilever an einem Basiskörper befestigt, sodass durch Bewegung des Basiskörpers alle Cantilever aus ihren jeweiligen Messlagen in ihre jeweiligen Ruhelagen bzw. umgekehrt bringbar sind.

[0025] Vorzugsweise ist der zumindest eine Cantilever so angeordnet, dass das erste Interferenzmuster, das aus Licht entsteht, das von dem ersten Cantilever reflektiert wurde, und ein zweites Interferenzmuster, das aus Licht entsteht, das von dem zweiten Cantilever reflektiert wurde, auf separaten Bereichen des Flächendetektors abgebildet werden. Hierunter ist insbesondere zu verstehen, dass Bereiche existieren, auf denen entweder das erste Interferenzmuster oder aber das zweite Interferenzmuster, nicht aber beide Interferenzmuster, abgebildet werden. Auf diese Weise ist es möglich, die beiden Interferenzmuster getrennt voneinander auszuwerten.

[0026] Vorzugsweise besitzt die Mikroskopeinheit einen Strahlteiler und einen, beweglichen oder unbeweglichen, Referenzspiegel. Alternativ ist die Mikroskopeinheit bewegbar und der Interferenzspiegel ist fix, beispielsweise zur Lichtquelle angeordnet.

[0027] Günstig ist es, wenn die Probenaufnahme zumindest ein x-y-z-Positioniersystem aufweist. Auf diese Art und Weise kann die Probe in drei Raumrichtungen positioniert werden. Besonders günstig ist es, wenn die Probenaufnahme einen Grobpositionierantrieb und einen Feinpositionierantrieb aufweist. Auf diese Weise kann die Probe schnell und mit hoher Positioniergenauigkeit auf eine vorgegebene Position gebracht werden.

[0028] Günstig ist es, wenn die Lichtmikroskopeinheit einen ersten optischen Punktsensor und zumindest einen zweiten optischen Punktsensor aufweist. Es ist dann möglich, das Interferenzmuster schneller auszuwerten als mit dem Flächendetektor. Vorzugsweise besitzt die Mikroskopeinheit eine Auswerteeinheit, die eingerichtet ist zum automatischen Erfassen von Helligkeitsdaten der Punktsensoren und zum Berechnen einer Auslenkung des Cantilevers aus den Helligkeitsdaten.

[0029] Es ist möglich, dass die Punktsensoren ihrerseits aus einzelnen Teil-Sensoren zusammengesetzt sind. Beispielsweise können die Punktsensoren durch einen CCD-Chip gebildet werden, solange das Messergebnis nicht orts aufgelöst verarbeitet wird. Beispielsweise kann das Messergebnis eines einzelnen Pixels verwendet werden. Alternativ können die Messergebnisse mehrerer Pixel zu einem Gesamtmesswert zusammengefasst werden. Unter

einer Auslenkung wird dabei insbesondere die Änderung der Position der Messspitze verstanden.

[0030] Günstig ist es, wenn die Lichtmikroskopeinheit ein Konfokal-Mikroskop bildet. Damit ist eine besonders hohe Ortsauflösung erreicht. Vorzugsweise ist die Lichtmikroskopeinheit dann ausgebildet zum Berechnen einer Durchbiegung und/oder einer Torsion des Cantilevers in der Messlage aus einem Detektor-Signal, das aus Licht entsteht, das von dem Cantilever reflektiert wurde.

[0031] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1a eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen Mikroskops, dessen Cantilever in der Ruhelage ist,

Fig. 1b das Mikroskop gemäß **Fig. 1a**, bei dem der Cantilever in der Messlage ist,

Fig. 2a ein Interferenzmuster, das mittels eines Flächendetektors eines erfindungsgemäßen Mikroskops aufgenommen wurde,

Fig. 2b das Interferenzmuster, das bei einer Veränderung einer Position des Cantileverkopfs bei ansonsten unverändertem Mikroskop erhalten wird,

Fig. 2c einen Ausschnitt der Aufnahmen der **Fig. 3a** und **Fig. 3b**,

Fig. 3a ein schematisches Diagramm zur Erläuterung der Messlage des Cantileverkopfs,

Fig. 3b eine Erläuterung der Ruhelage des Cantileverkopfs,

Fig. 4a eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Mikroskops, bei dem die Mikroskopeinheit Punktdetektoren zur schnellen Positionserfassung des Cantileverkopfs aufweist,

Fig. 4b eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Mikroskops, bei dem die Mikroskopeinheit ein Konfokalmikroskop bildet und ausgebildet ist zum differenziellen konfokalen Messen,

Fig. 5a eine Detailansicht eines Objektivs eines erfindungsgemäßen Mikroskops, bei dem die Lichtmikroskopeinheit ein Mirau-Interferometer bildet,

Fig. 5b das Objektiv eines erfindungsgemäßen Mikroskops gemäß einer weiteren Ausführungsform, bei dem die Lichtmikroskopeinheit ein Michelson-Interferometer bildet,

Fig. 5c die gemessenen Intensitäten zweier Punktsensoren in Abhängigkeit von deren Posi-

tion relativ zu einer Position des Cantileverkopfs und

Fig. 6 eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Mikroskops mit einer Mehrzahl an Cantilevern.

[0032] **Fig. 1a** zeigt ein erfindungsgemäßes Mikroskop 20 mit einer Probenaufnahme 23, einer Lichtquelle 10 und einem Objektiv 5 sowie einem optischen Flächendetektor 12. Die Probenaufnahme 23 umfasst im vorliegenden Fall ein Grobpositioniersystem 4 und ein Feinpositioniersystem 1. Mit diesen beiden Systemen 1, 4 kann eine Probe 13 auf eine vorgegebene Position $P(x, y, z)$ positioniert werden. Das Objektiv 5 leitet Licht 24 von der Lichtquelle 10 in einem Strahlengang S auf eine Probenoberfläche 26 der Probe 13.

[0033] Das Mikroskop 20 umfasst zudem eine Rastersondeneinheit 28, die einen Cantilever 21 mit einer Messspitze 22 aufweist. Die Rastersondeneinheit 28 umfasst zudem einen Cantilever-Antrieb 30 zum Bewegen eines Cantileverkopfs 32. Am Cantileverkopf 32 ist die Messspitze 22 ausgebildet. Der Cantilever 21 kann aus einer in **Fig. 1a** gezeigten Ruhelage in eine in **Fig. 1b** gezeigte Messlage gebracht werden. Dazu kann der Cantilever 21 an einem Basiskörper 31 befestigt sein. In **Fig. 1a** ist der Fall gezeigt, in dem der Basiskörper 31 schwenkbar um eine Schwenkachse A bewegbar ist. Bei der Schwenkbewegung handelt es sich um eine geführte Bewegung.

[0034] Im vorliegenden Fall umfasst das Mikroskop 20 zudem eine Okularlinse 11 zum Abbilden von Licht, das von der Probenoberfläche 26 stammt, auf den Flächendetektor 12. Die Lichtquelle 10, die Probenaufnahme 23, das Objektiv 5 und der optische Flächendetektor 12 sind Teil einer Mikroskopeinheit 34 des Mikroskops 20. Die Mikroskopeinheit 34 umfasst in der vorliegenden Ausführungsform zudem eine Okularlinse 11 sowie einen Kollimator 8 und einen Strahlteiler 7.

[0035] **Fig. 1b** zeigt das Mikroskop 20 gemäß **Fig. 1a**, bei dem der Cantilever 21 in seiner Messlage ist.

[0036] Das Mikroskop 20 gemäß der **Fig. 1a** und **Fig. 1b** funktioniert so, dass das Licht der Lichtquelle 10 vom Kollimator 8 kollimiert, vom Strahlteiler 7 umgelenkt und in das Objektiv 5 geführt wird. In dem Objektiv 5 wird das Licht von einem Strahlteiler 50 geteilt (siehe **Abb. 6a** oder **Abb. 6b**), wo ein Referenz- und Messstrahl erzeugt wird. Der Referenzstrahl wird vom Spiegel 48 reflektiert, während der Messstrahl von der Probenoberfläche 26 reflektiert wird. Wenn die reflektierten Strahlen am Strahlteiler 50 rekombiniert werden, wird das Interferenzmuster erzeugt. Dieses Interferenzmuster 38 wird von der

Okularlinse 11 auf den Flächendetektor 12 abgebildet, der das Interferenzmuster 38 aufnimmt.

[0037] Der Flächendetektor 12 ist mit einer schematisch eingezeichneten Auswerteeinheit 36 zum Erfassen der Messdaten verbunden. Die Auswerteeinheit 36 berechnet eine Oberflächentopographie T aus den Messdaten des Flächendetektors 12.

[0038] Wenn es sich bei der Mikroskopeinheit 34 - wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen - um ein Mirau-Interferometer handelt, so enthält das Objektiv 5 einen Referenzspiegel 48, der in **Fig. 5a** gezeigt ist.

[0039] **Fig. 2a** zeigt ein Interferenzmuster 38, wie es vom Flächendetektor 12 aufgenommen wird.

[0040] **Fig. 2b** zeigt das Interferenzmuster 38, wenn sich der Cantileverkopf 32 (vgl. **Fig. 1b**) relativ zum Flächendetektor 12 bewegt hat. Es kommt zu einer Verschiebung des Interferenzmusters 38 in Bezug auf ein Koordinatensystem 40, das ortsfest zum Flächendetektor 12 ist. Aus dieser Verschiebung berechnet die Auswerteeinheit 36 eine Positionsveränderung des Cantileverkopfs 32.

[0041] **Fig. 2c** zeigt einen Querschnitt durch die Interferenzmuster 38 (**Fig. 2a**) und **Fig. 38'** (**Fig. 2b**).

[0042] **Fig. 3a** zeigt eine weitere Ausführungsform der Rastersondeneinheit 28. In der Ausführungsform gemäß **Fig. 3a** ist der Cantilever 21 am Basiskörper 31 befestigt, der an einer Aufnahme 42 befestigt werden kann, sodass der Cantilever 21 in seiner Messlage ist.

[0043] **Fig. 3b** zeigt den Fall, dass der Basiskörper 31 an einem Halter 44 befestigt ist, sodass der Cantilever 21 in seiner Ruhelage ist.

[0044] **Fig. 4a** zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Mikroskops 20, das zwei Punktsensoren 19.1, 19.2 aufweist. Die Punktsensoren 19.1, 19.2 sind jeweils hinter einer zugeordneten Blende 18.1, 18.2 angeordnet.

[0045] Über einen zweiten Strahlteiler 17 wird Licht, das danach auf den Flächendetektor 12 fällt, teilweise ausgekoppelt und zu den Blenden 18.1, 18.2 geleitet. Die Position der Blenden 18.1, 18.2 ist so wählbar, dass die Punktsensoren 19.1, 19.2 jeweils ein Intensitätssignal zu einer definierten Phasenverschiebung liefert, anhand derer eine Änderung einer Höhenposition $z_{32}(t)$ des Cantileverkopfs in Abhängigkeit von der Zeit t bestimmt werden kann. Die Verwendung der Punktsensoren erlaubt eine höhere Messgeschwindigkeit und daher das Detektieren von Schwingungen des Cantileverkopfs 32 mit höheren Frequenzen.

[0046] Fig. 4b zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Mikroskops 20, bei dem die Lichtmikroskopeinheit 34 ein konfokales Mikroskop bildet. Bei dieser Ausführungsform wird das Licht von der Lichtquelle 10 emittiert, verläuft durch eine Blende 18.3, einen Strahlteiler 9.2 und wird dann vom Strahlteiler 7 umgelenkt und auf die Rückseite des Cantilevers 21 gelenkt. Von dort wird der Strahl reflektiert und verläuft dann erneut durch das Objektiv 5, den Strahlteiler 7, wird dann von dem Strahlteiler 9.1 reflektiert und dann zunächst auf die Blenden 18.1, 18.2 und danach auf die Punktsensoren 19.1, 19.2.

[0047] Es ist günstig, wenn eine Öffnung der Blende 18.1 leicht versetzt angeordnet ist zu einer Position p , die mit gestrichelten Linien eingezeichnet ist. Die Position p stellt die zugeordneten Punkte der Blende 18.3 dar. Während die Blende 18.1 um einen kleinen Betrag vor der Position p angeordnet ist, ist die Blende 18.2 um einen kleinen Betrag dahinter angeordnet.

[0048] Fig. 5c zeigt die zugehörige Punktantwort, die auch als Punktspreizfunktion (englisch: point spread function) bezeichnet wird. Die Punktantwort ist diejenige Kurve, die die Intensität I in Abhängigkeit von der Höhenposition $z_{32}(t)$ des Cantileverkopfs angibt. **Fig. 5c** zeigt dieses Diagramm. Die Punktsensoren 19.1, 19.2 sind vorzugsweise so angeordnet, dass sich die in **Fig. 5c** gezeigte Punktantwort ergibt.

[0049] Auf den Intensitäten $I_{19.1}$ und $I_{19.2}$ kann die Bewegung $z_{32}(t)$ berechnet werden. Das wird von der Auswerteeinheit 36 automatisch durchgeführt. Diese Technik ist als differential confocal detection technique bekannt.

[0050] Fig. 5a zeigt ein Objektiv 5 eines erfindungsgemäßen Mikroskops, wobei das Objektiv 5 vom Mirau-Typ ist. Es ist zu erkennen, dass das Objektiv 5 eine Linse 46 sowie einen Referenzspiegel 48 aufweist.

[0051] Fig. 5b zeigt ein Objektiv 5 vom Michelson-Typ, bei dem der Referenzspiegel 48 über einen Strahlteiler 50 beleuchtet wird.

[0052] Fig. 6 zeigt eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen Mikroskops gemäß einer weiteren Ausführungsform. Dieses Mikroskop 20 besitzt einen zweiten Cantilever 21.2, einen dritten Cantilever 21.3. Es ist möglich, dass das Mikroskop 20 mehr als drei Cantilever aufweist. Alle Cantilever 21. i ($i = 1, 2, \dots, N$ mit N : Anzahl der Cantilever) sind am gleichen Basiskörper befestigt und werden von einer gemeinsamen oder von unterschiedlichen Cantilever-Antrieben angetrieben.

[0053] Fig. 6 zeigt, dass es auch möglich ist, dass die Lichtmikroskopeinheit 34 einen Objektivwechsler 52 besitzen kann.

Bezugszeichenliste

| | |
|----|-----------------------|
| 1 | Feinpositioniersystem |
| 4 | Grobpositioniersystem |
| 5 | Objektiv |
| 7 | Strahlteiler |
| 8 | Kollimator |
| 9 | Strahlteiler |
| 10 | Lichtquelle |
| 11 | Okularlinse |
| 12 | Flächendetektor |
| 13 | Probe |
| 17 | zweiter Strahlteiler |
| 18 | Blende |
| 19 | Punktsensor |
| 20 | Mikroskop |
| 21 | Cantilever |
| 22 | Messspitze |
| 23 | Probenaufnahme |
| 24 | Licht |
| 26 | Probenoberfläche |
| 28 | Rastersondeneinheit |
| 30 | Cantilever-Antrieb |
| 31 | Basiskörper |
| 32 | Cantileverkopf |
| 34 | Lichtmikroskopeinheit |
| 36 | Auswerteeinheit |
| 38 | Interferenzmuster |
| 40 | Koordinatensystem |
| 42 | Annahme |
| 44 | Halter |
| 46 | Linse |
| 48 | Referenzspiegel |
| 50 | Strahlteiler |
| 52 | Objektivwechsler |
| A | Schwenkachse |
| I | Intensität |
| i | Laufindex |

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| N | Cantilever-Anzahl |
| O | optische Achse |
| p | Position |
| P | Position |
| S | Sichtfeld |
| s | Strahlengang |
| T | Oberflächentopographie |
| t | Zeit |
| $z_{32}(t)$ | Höhenposition des Cantileverkopfs |

Patentansprüche

1. Mikroskop (20) mit
 (a) einer Lichtmikroskopeinheit (34), die
 (i) eine Probenaufnahme (23) zum Aufnehmen einer Probe (13),
 (ii) eine Lichtquelle (10),
 (iii) ein Objektiv (5) zum Leiten von Licht (24) der Lichtquelle (10) in einem Strahlengang (S) auf die Probe (13) und
 (iv) einen optischen Flächendetektor (12) zum Aufnehmen eines Bilds der Probe (13) im Sichtfeld (s) des Flächendetektors (12) aufweist, **gekennzeichnet durch**

(b) eine Rastersondeneinheit (28),
 (i) die mindestens einen Cantilever (21) mit einer Messspitze (22) zum Rastern einer Probenoberfläche (26) der Probe (13) und
 (ii) mindestens einen Cantilever-Antrieb (30) zum Bewegen des Cantilevers (21) aufweist,
 (iii) wobei der Cantilever (21)
 - in eine Ruhelage, in der der Cantilever (21) nicht im Strahlengang (S) ist, und
 - in eine Messlage, in der ein Cantileverkopf des Cantilevers (21) im Strahlengang (S) ist, bringbar ist.

2. Mikroskop (20) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

(a) die Rastersondeneinheit (28) so ausgebildet ist, dass ein Cantileverkopf (32) des Cantilevers (21) im Sichtfeld (s) des Flächendetektors (12) angeordnet ist, wenn der Cantilever (21) in der Messlage ist und dass
 (b) die Lichtmikroskopeinheit (34) ausgebildet ist zum Detektieren einer Auslenkung des Cantilevers (21) mittels des optischen Flächendetektors (12).

3. Mikroskop (20) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rastersondeneinheit (28) ausgebildet ist zum, insbesondere geführten, Bewegen des Cantilevers (21) aus der Ruhelage in die Messlage.

4. Mikroskop (20) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lichtmikroskopeinheit (34)

ausgebildet ist zum dreidimensionalen topographischen Vermessen der Probenoberfläche (26), wenn sich der Cantilever (21) in der Ruhelage befindet.

5. Mikroskop (20) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lichtmikroskopeinheit (34) ausgebildet ist zum Berechnen einer Durchbiegung und/oder einer Torsion des Cantilevers (21) in der Messlage aus einem Interferenzmuster, das aus Licht (24) entsteht, das von dem Cantilever (21) reflektiert wurde.

6. Mikroskop (20) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (a) die eine Rastersondeneinheit (28) mindestens einen zweiten Cantilever (21.2) aufweist und
 (b) der zumindest eine zweite Cantilever (21.2) so angeordnet ist, dass ein zweiter Cantileverkopf (32.2) des zweiten Cantilevers (21.2) im Sichtfeld (s) des Flächendetektors (12) angeordnet ist, wenn der zumindest eine zweite Cantilever (21.2) in der Messlage ist und/oder dass
 (c) der zumindest eine zweite Cantilever (21.2) so angeordnet ist, dass
 - das erste Interferenzmuster, das aus Licht (24) entsteht, das von dem ersten Cantilever (21.1) reflektiert wurde, und
 - ein zweites Interferenzmuster, das aus Licht (24) entsteht, das von dem zweiten Cantilever (21.2) reflektiert wurde, auf separaten Bereichen des Flächendetektors (12) abgebildet werden.

7. Mikroskop (20) nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lichtmikroskopeinheit (34)

(a) einen Strahlteiler (50) und
 (b) einen Referenzspiegel (48) aufweist.

8. Mikroskop (20) nach einem der Ansprüche 4 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Probenaufnahme (23) zumindest ein x-y-z-Positionierungssystem besitzt, das ein Grobpositioniersystem (4) und einen Feinpositionier-Antrieb (1) aufweist.

9. Mikroskop (20) nach einem der Ansprüche 4 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lichtmikroskopeinheit (34)

(a) einen ersten optischen Punktsensor (19.1),
 (b) zumindest einen zweiten optischen Punktsensor (19.2) und
 (c) eine Auswerteeinheit (36) aufweist, die eingerichtet ist zum automatischen
 (i) Erfassen von Helligkeitsdaten der Punktsensoren (19) und
 (ii) Berechnen einer Auslenkung des Cantilevers (21) aus den Helligkeitsdaten.

10. Mikroskop (20) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

die Lichtmikroskopeinheit (34)

(a) ein Konfokal-Mikroskop (20) bildet und

(b) ausgebildet ist zum Berechnen einer Durchbiegung und/oder einer Torsion des Cantilevers (21) in der Messlage aus einem Detektor-Signal, das aus Licht (24) entsteht, das von dem Cantilever (21) reflektiert wurde.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

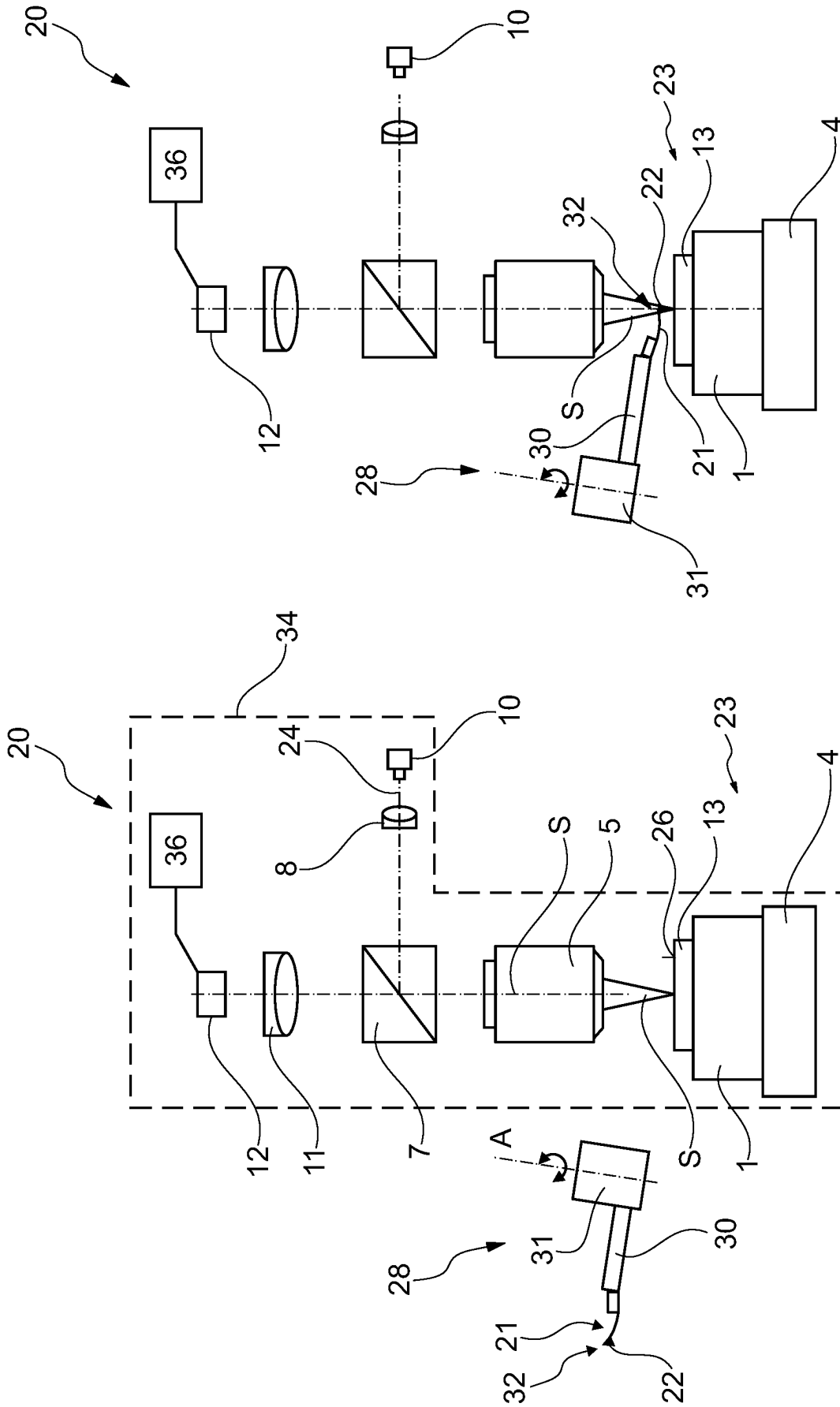


Fig. 1b

Fig. 1a

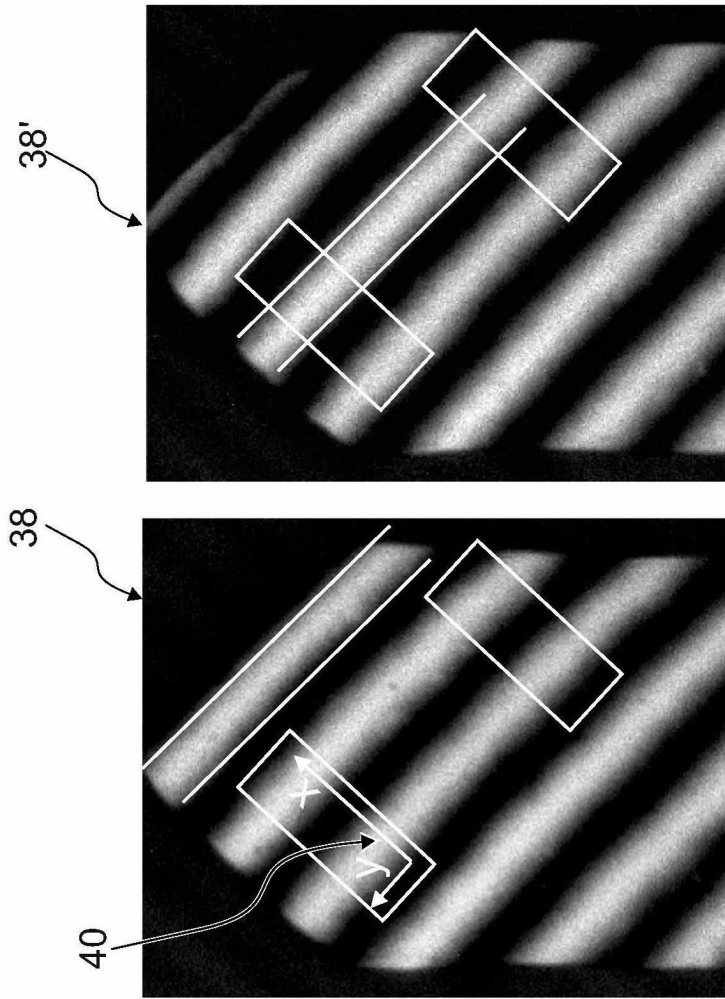
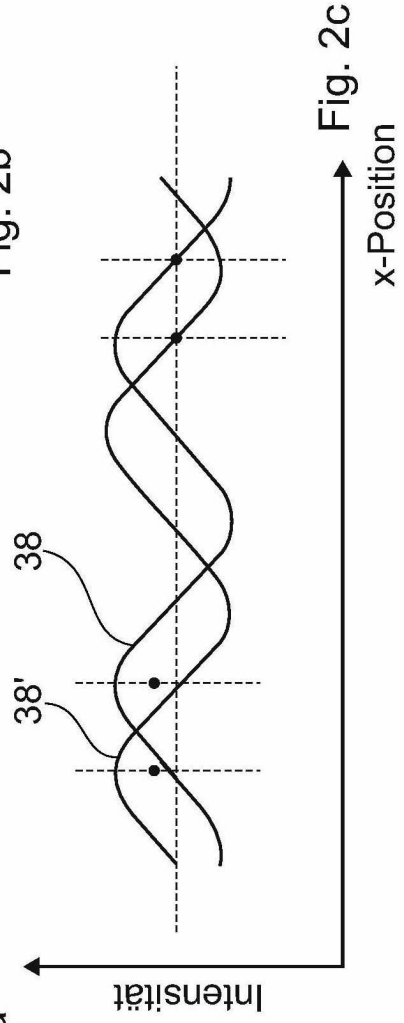


Fig. 2a



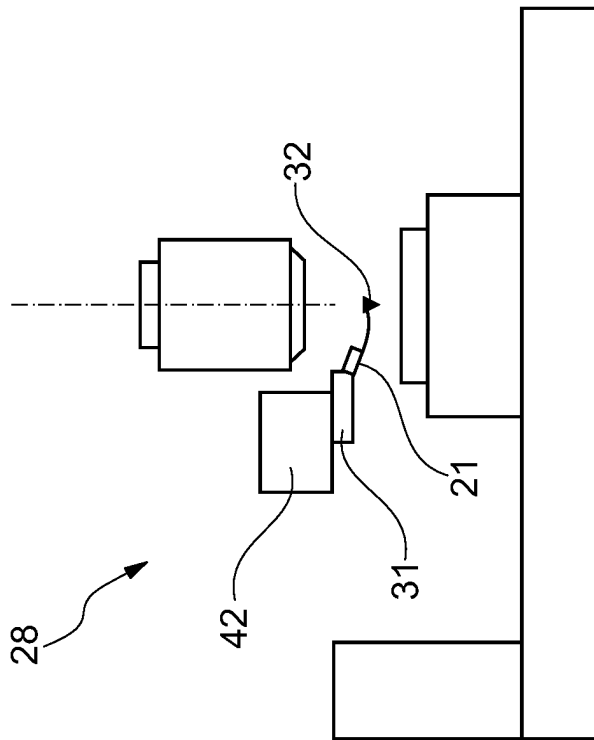


Fig. 3a

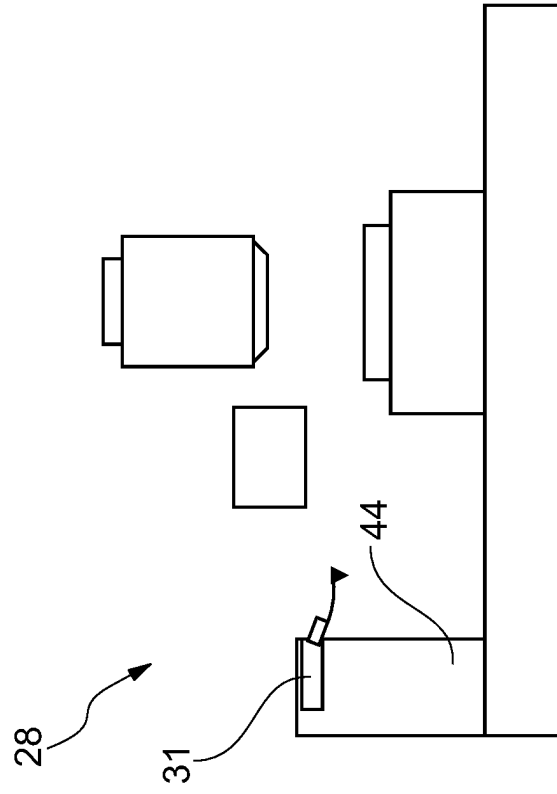


Fig. 3b

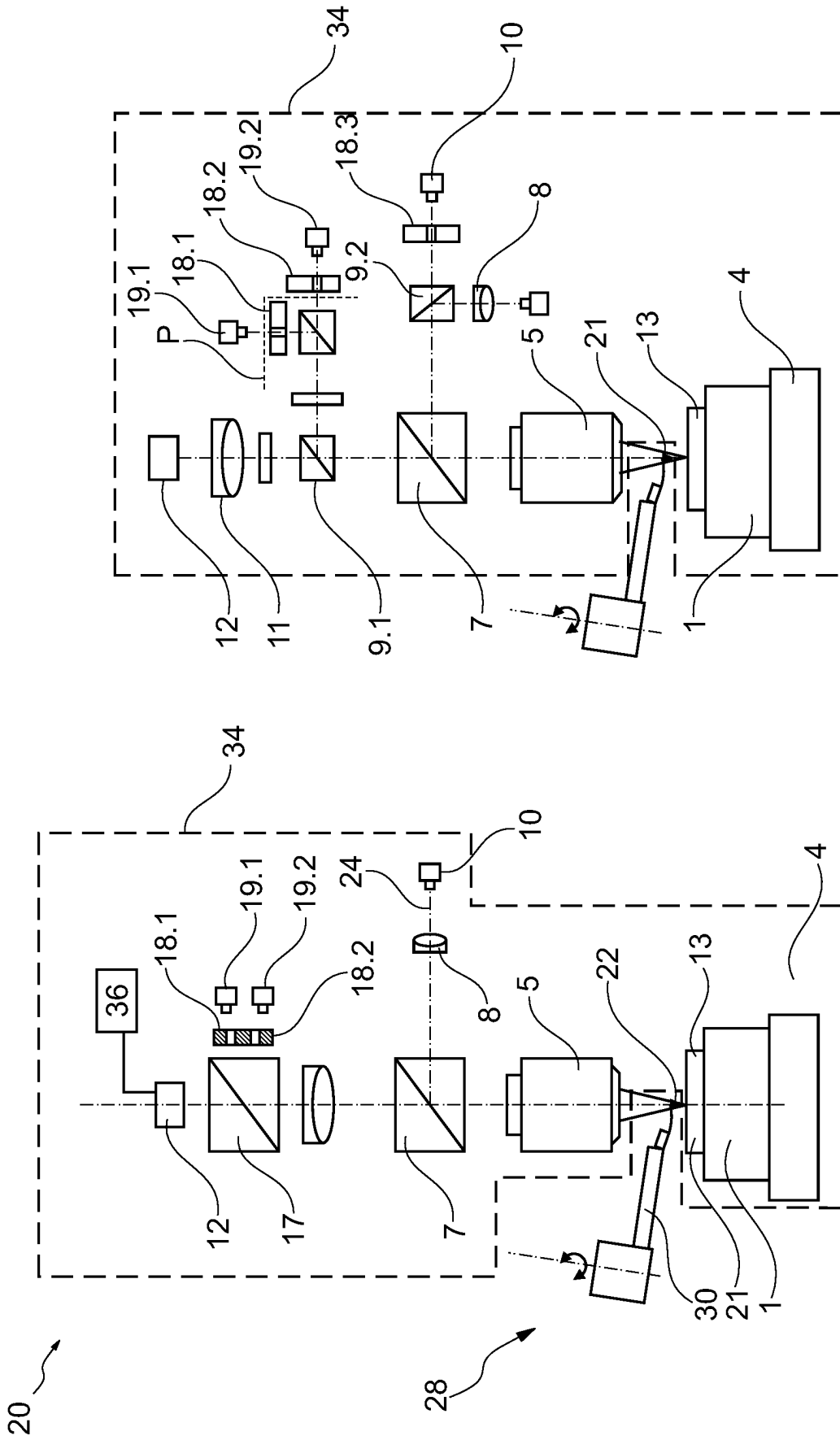


Fig. 4b

Fig. 4a

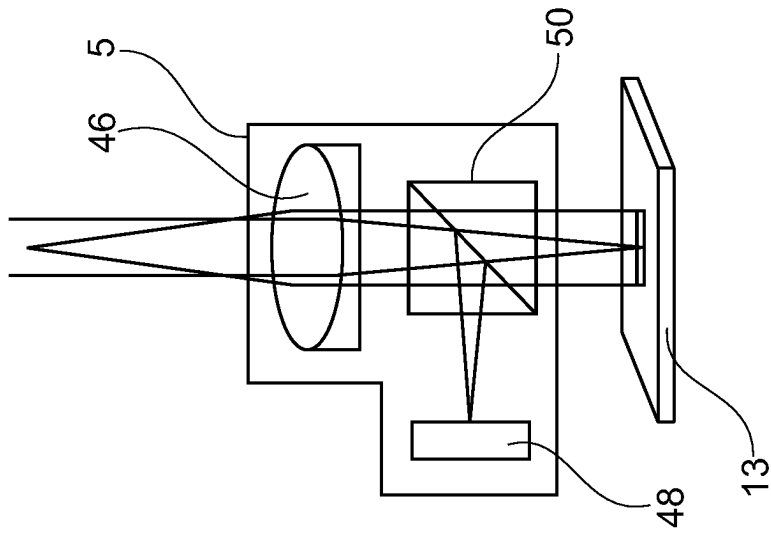


Fig. 5b

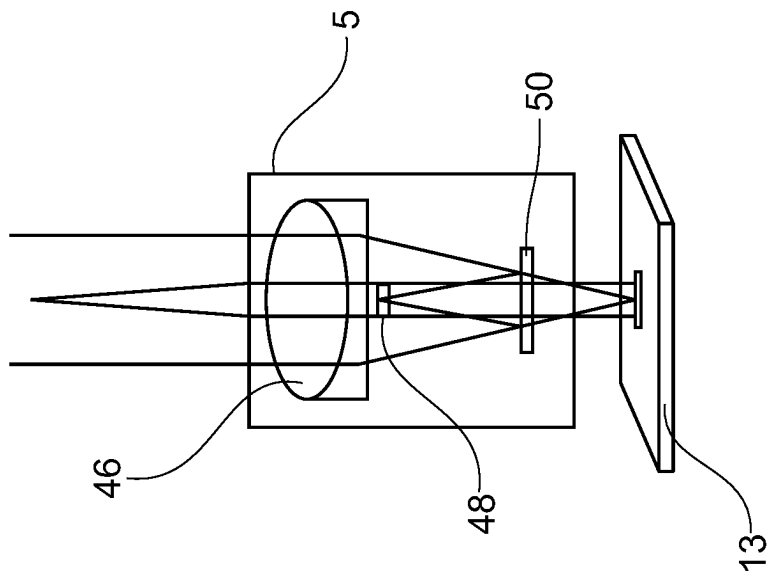


Fig. 5a

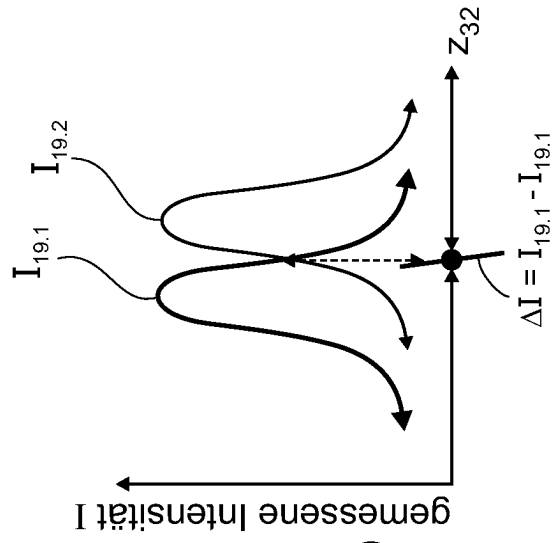


Fig. 5c

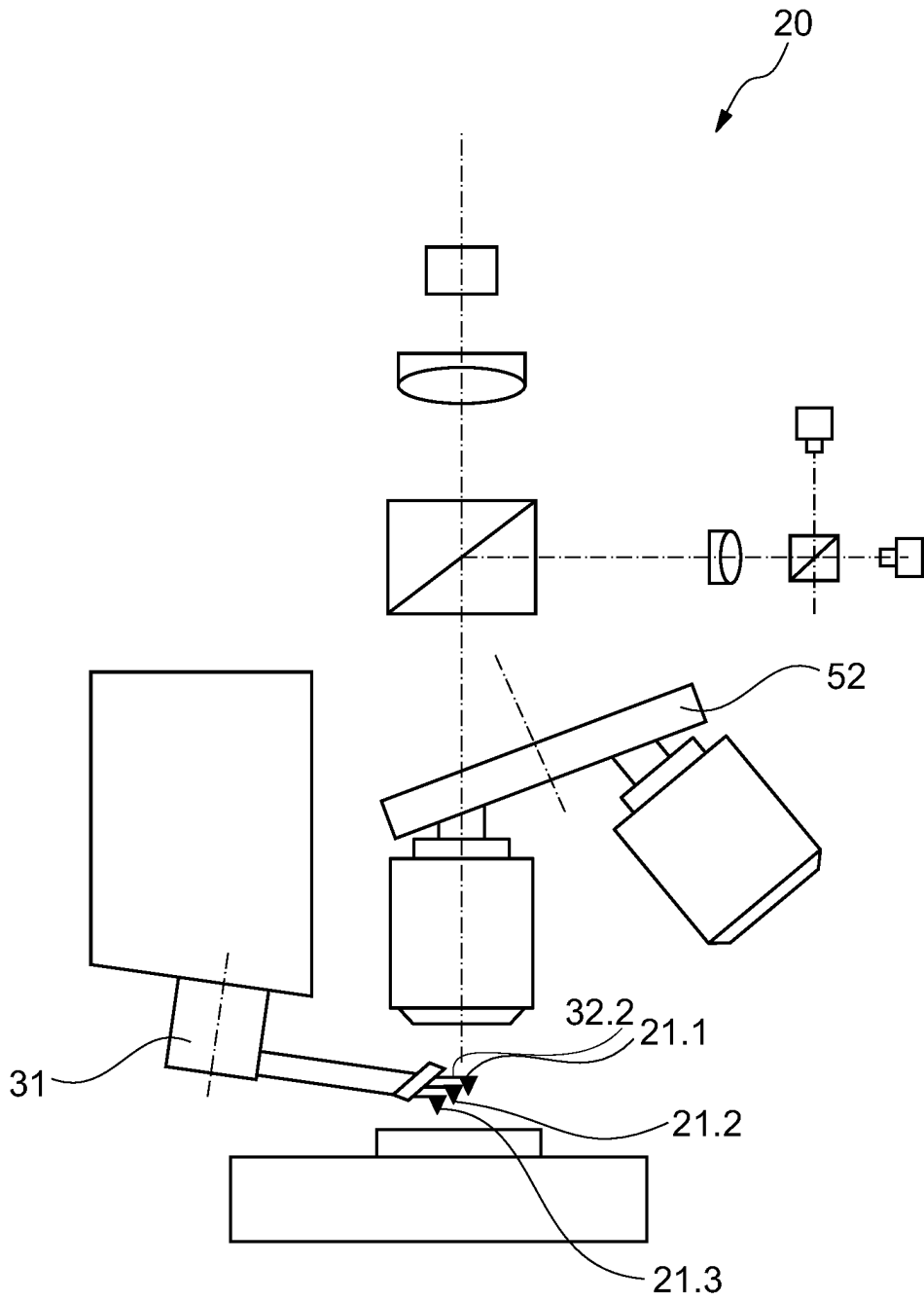


Fig. 6