



(10) **DE 10 2012 111 008 A1** 2014.05.15

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2012 111 008.5**  
(22) Anmeldetag: **15.11.2012**  
(43) Offenlegungstag: **15.05.2014**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**  
**G01J 3/28 (2006.01)**  
**G12B 5/00 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Precitec Optronik GmbH, 63263, Neu-Isenburg, DE**

(74) Vertreter:  
**Schweiger & Partner, 80333, München, DE**

(72) Erfinder:  
**Schönleber, Martin, Dr., 63743, Aschaffenburg, DE; Michelt, Berthold, 65195, Wiesbaden, DE; Kunkel, Matthias, 63571, Gelnhausen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

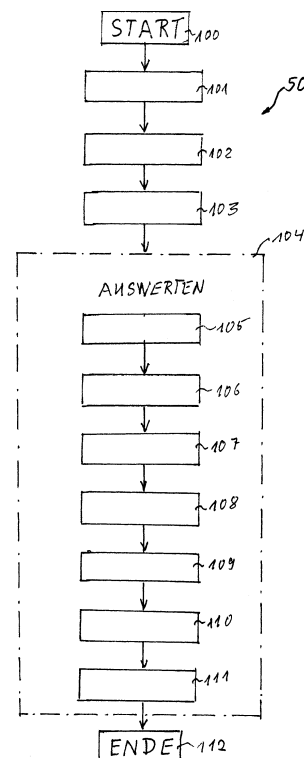
**DE 10 2004 011 189 A1**  
**DE 10 2004 052 205 A1**  
**DE 10 2005 036 719 A1**  
**DE 10 2008 041 062 A1**  
**FR 2 950 441 A1**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Optisches Messverfahren und optische Messvorrichtung zum Erfassen einer Oberflächentopographie**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein optisches Messverfahren zum Erfassen einer Oberflächentopographie (1) eines Messobjektes (2). Dazu wird eine Messvorrichtung (3) mit einem Messkopf (4) in einer Messkopfführungsvorrichtung (5) für eine chromatisch-konfokale Erfassung der Oberflächentopographie (1) oder für eine spektralinterferometrische OCT Abstandserfassung zu der Oberflächentopographie (1) bereitgestellt. Zunächst wird spektral breitbandiges Licht einer Lichtquelle (6) aus einem Faserarray (7) mit i Fasern (8) von i Messspots (12 bis 15) über eine gemeinsame Messkopfoptik (10) unter Ausbilden eines Spottarrays (11) aus i Messspots (12 bis 15) auf das Messobjekt (2) aufgebracht. Dann werden i Reflektionsspektren der i Messkanäle erfasst und digitalisiert. Abschließend werden die digitalisierten Reflektionsspektren unter Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (5) ausgewertet.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein optisches Messverfahren zum Erfassen einer Oberflächentopographie eines Messobjektes. Dazu wird eine Messvorrichtung mit einem Messkopf in einer Messkopfführungsvorrichtung für ein Erfassen der Oberflächentopographie bereitgestellt.

**[0002]** Eine derartige Messvorrichtung zum Vermessen einer Oberfläche ist aus der Druckschrift DE 10 2008 041 062 A1 bekannt. Die bekannte Messvorrichtung erzeugt einen Messlichtstrahl, welcher nach Durchsetzen von mindestens drei separat fokussierenden optischen Komponenten auf die Oberfläche des Objektes auftrifft, davon reflektiert wird und von einem ortsauflösenden Lichtdetektor zusammen mit Referenzlicht nach interferenter Überlagerung detektiert wird.

**[0003]** Dazu weist die bekannte Messvorrichtung eine Optikbaugruppe auf, welche die mindestens drei separat fokussierenden optischen Komponenten umfasst. Die Hauptachsen dieser separat fokussierenden optischen Komponenten sind zueinander versetzt und nebeneinander angeordnet. Darüber hinaus weist die bekannte Messvorrichtung einen in einem Strahlengang des Messlichtstrahls angeordneten Strahlteiler auf. Außerdem ist für die bekannte Vorrichtung eine Referenzfläche vorgesehen und ein ortsauflösender Lichtdetektor.

**[0004]** Die Lichtquelle, der Strahlteiler und die Optikbaugruppe sind relativ zueinander derart angeordnet, dass von der Lichtquelle emittiertes und die fokussierenden optischen Komponenten durchsetzendes Messlicht auf die Oberfläche trifft und von dieser zurückgeworfen wird und über die fokussierenden optischen Komponenten auf den Detektor trifft. Außerdem weist die bekannte Messvorrichtung ein Auswertesystem zum Empfang von Bilddaten von dem ortsauflösenden Lichtdetektor und zur Ausgabe von Messdaten, die eine Oberflächenform der Oberfläche repräsentieren, auf. Dazu werden Abstandswerte, die einen Abstand eines Orts der Oberfläche von den fokussierenden optischen Komponenten repräsentieren, erfasst. Aus diesen Abstandswerten bildet das Auswertesystem Parameter, welche die Oberflächenform der Oberfläche darstellen.

**[0005]** Außerdem offenbart die obige Druckschrift ein Verfahren zum Vermessen einer Oberfläche eines Objekts, das im Wesentlichen nachfolgende Verfahrensschritte umfasst. Zunächst wird ein Messlicht erzeugt. Aus dem Messlicht werden drei konvergierende Teilstrahlen eines ersten Teils des Messlichtes gebildet, um drei mit Abstand voneinander angeordnete Bereiche der Oberfläche des Objektes zu beleuchten. Das reflektierte Licht bzw. die drei Teilstrahlen des von der Oberfläche reflektierten Lichtes werden zusammen mit einem zweiten Teil des Messlichtes auf einen ortsauflösenden Detektor gerichtet, um dort Interferenzen zu bilden. Diese Interferenzen werden schließlich durch einen Detektor, der Lichtintensitäten detektiert, analysiert, um die Oberflächenform der Oberfläche des Objekts durch entsprechende Messdaten zu repräsentieren.

**[0006]** Ein Nachteil der bekannten Vorrichtung ist es, dass sie aufgrund ihrer separat und nebeneinander liegenden optischen Komponenten einen hohen Raumbedarf beansprucht. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass keinerlei Vorkehrungsmaßnahmen getroffen sind, systematische Messfehler, Langzeitveränderungen in der absoluten Abstandsmessung oder auch Abweichungen von einem Sollweg, auf dem das Messobjekt in der bekannten Ausführungsform geführt wird, in irgendeiner Form bei der Auswertung zu berücksichtigen oder die Messergebnisse entsprechend zu korrigieren. Demzufolge ist das bekannte Messsystem nicht in der Lage, zuverlässige Daten insbesondere im Nanometerbereich zu liefern, um Oberflächentopographien in derartigen Dimensionen zu erfassen.

**[0007]** Unter chromatisch-konfokaler Abstandsmesstechnik wird hierin ein Verfahren verstanden, welches den Effekt nutzt, dass Linsen für unterschiedliche Wellenlängen des Lichts unterschiedliche Brennpunkte haben. Die chromatisch-konfokale Abstandsmessung verwendet dabei die Dispersion von spektral breitbandigem Licht in einem optischen Abbildungssystem, um den Abstand einer reflektierenden Oberfläche zum Messkopf zu bestimmen. Eine spektral breitbandige Punktlichtquelle, die üblicherweise durch eine erste Lochblende oder ein optisches Faserende realisiert wird, wird mit dem optischen Abbildungssystem auf das Objekt fokussiert. Der Abstand des Fokus vom Abbildungssystem ist dabei eine eindeutige, fest definierte Funktion von der Wellenlänge. Das reflektierte Licht wird über das gleiche Abbildungssystem wieder abgebildet und vom Beleuchtungsstrahlengang ausgekoppelt und auf eine Lochblende abgebildet, die am Spiegelpunkt eines Strahlteilers angeordnet ist. Alternativ dazu kann das reflektierte Licht auch direkt in die erste Lochblende rückgeführt werden und danach ausgekoppelt werden. Ein Detektor hinter der Lochblende bestimmt dann die dominante Wellenlänge des reflektierten Lichtes. Aus dem Wissen über die Fokusweiten der einzelnen Wellenlängen kann aus der dominanten Wellenlänge direkt der Objektabstand bestimmt werden. Ein Vorteil dieses Verfahren ist das Fehlen von bewegten Komponenten.

**[0008]** In einer bevorzugten Ausführungsform wird dabei das Licht der Lichtquelle in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt, durchläuft einen Faserkoppler und tritt an einem Faserende aus dem Messkopf wieder aus. Das vom Messobjekt zurücklaufende Licht tritt wieder in das Faserende ein und wird am Faserkoppler in Richtung zum Detektor abgezweigt. Das Faserende bildet hierbei gleichzeitig den Lichtpunkt für die Objektbeleuchtung sowie die Lochblende für die Filterung des Messlichts.

**[0009]** Mit Optische Kohärenztomografie (OCT) wird ein Untersuchungsverfahren bezeichnet, bei dem spektral breitbandiges Licht mit Hilfe eines Interferometers zur Entfernungsmessung von Objekten eingesetzt wird. Das Untersuchungsobjekt wird hierbei punktweise abgetastet. Dabei wird ein Arm mit bekannter optischer Weglänge als Referenz zu einem Messarm herangezogen. Die Interferenz der Teilwellen aus beiden Armen ergibt dann ein Muster, aus dem man die Differenz der optischen Weglänge der beiden Arme herauslesen kann. Man unterscheidet hierbei zwischen zwei spektralinterferometrischen Mess- und Auswerteverfahren, der Time Domain OCT sowie der Frequency Domain OCT. Deshalb spricht man einerseits vom Signal im Zeitbereich (time domain (TD)) und andererseits vom Signal im Frequenzbereich (frequency domain (FD)). Einfach ausgedrückt bedeutet dies, dass man entweder den Referenzarm in der Länge verändert und kontinuierlich die Intensität der Interferenz misst, ohne auf das Spektrum Rücksicht zu nehmen (time domain), oder die Interferenz der einzelnen spektralen Komponenten erfasst (frequency domain).

**[0010]** Eine Aufgabe der Erfindung ist es, ein optisches Messverfahren zum Erfassen von Oberflächentopographien eines Messobjektes bereitzustellen, mit dem die Messgenauigkeit bis in den Nanometerbereich hinein verbessert wird, und eine dafür geeignete Messvorrichtung zu schaffen.

**[0011]** Diese Aufgabe wird mit dem Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

**[0012]** In einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein optisches Messverfahren zum Erfassen einer Oberflächentopographie eines Messobjektes insbesondere im Nanometerbereich bereitgestellt. Dazu wird eine Messvorrichtung mit einem Messkopf in einer Messkopfführungsvorrichtung für eine chromatisch-konfokale Erfassung der Oberflächentopographie oder für eine spektralinterferometrische OCT Abstandserfassung zu der Oberflächentopographie bereitgestellt.

**[0013]** Zunächst wird spektral breitbandiges Licht einer Lichtquelle aus einem Faserarray mit  $i$  Fasern von  $i$  Messkanälen über eine gemeinsame Messkopfoptik unter Ausbilden eines Spotarrays aus  $i$  Messspots auf das Messobjekt aufgebracht. Dann werden  $i$  Reflektionsspektren der  $i$  Messkanäle erfasst und digitalisiert. Dann werden die Reflexionsspektren jedes Messkanals für sich ausgewertet und ein Abstandswert bestimmt. Danach wird die Gesamtheit der Abstandswerte zu verschiedenen Messkanälen und Zeitpunkten kombiniert ausgewertet, um systematische Messfehler und Abweichbewegungen herauszurechnen.

**[0014]** Ein Vorteil dieses Messverfahrens liegt darin, dass die angezeigten Messwerte für eine lokale Oberflächentopographie auf systematische Fehler und auf Abweichbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung überprüft werden, so dass eine Trennung zwischen einer reellen Oberflächentopographie und reellen Angaben über Messfehler sowie Abweichbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung erfolgen kann.

**[0015]** Dazu sind eine Mehrzahl von Auswerteschritten erforderlich, die im Einzelnen ein Erfassen von geometrischen Abstandswerten der  $i$  Messkanäle zur Zeit  $t(j)$  erfordern. Zudem wird ein Erfassen von dreidimensionalen Positionswerten für die  $i$  Messspots auf der Messobjekttoberfläche zur Zeit  $t(j)$  durchgeführt. Darüber hinaus wird eine lokale Neigung der Messobjekttoberfläche relativ zu dem Messkopf erfasst. Anschließend erfolgt ein Korrelieren von auf der erfassten Neigung basierenden systematischen Messfehlern. An diesen Schritt schließt sich ein Erstellen von lokalen Topographien für die redundanten  $i$  Messkanäle an.

**[0016]** Zum Abschluss erfolgt ein Korrelieren der lokalen Topographien unter Separieren von Abweichbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung durch Separieren einer Holprigkeit von Positionen und Orientierungen des Messkopfes bzw. der davon abhängigen Abtastlinien des Messlichts in den einzelnen Messkanälen auf Grund der Messkopfführungsvorrichtung von der reellen bzw. wahren Oberflächentopographie mit einer Messwertauflösung im Nanometerbereich. Abschließend erfolgt eine Ausgabe einer bereinigten Oberflächentopographie und einer realen Bahn und Orientierung der Messkopfführungsvorrichtung des Messkopfes. Diese Auswerteschritte werden unter Vergleich der unterschiedlichen Abtastwerte ermittelt.

**[0017]** Allgemein ist es möglich, ein Abtasten mit unterschiedlichen Taktraten oder ein Abtasten in einer Linie mit den in Abtastrichtung angeordneten Messspots in unterschiedlichen Abständen durchzuführen, um Artefakte durch Unterabtastung zu vermeiden.

**[0018]** Eine weitere Technik wird eingesetzt, um eine lokale Neigung der Messobjektoberfläche relativ zu dem Messkopf mittels drei Messspots zu ermitteln, wobei vorzugsweise die drei Messspots auf der Messobjektoberfläche in einem gleichschenkligen Dreieck angeordnet werden. Hierbei kann ein Normalenvektor des Dreiecks, welcher die lokale Neigung repräsentiert, aus Abstandswerten im Dreieck bestimmt und anschließend beispielsweise über eine Auswertetabelle die Neigungsfehler der Messkopfführungsvorrichtung ermittelt und herausgerechnet werden.

**[0019]** Eine weitere Variante zur Korrektur der Messwerte besteht darin, einen dreidimensionalen Beschleunigungssensor an der Messkopfführungsvorrichtung oder an dem Messkopf zu fixieren und in situ dreidimensional die Abweichungsbewegungen zu erfassen, mit denen die Messwerte der Oberflächentopographiemessung entsprechend korrigiert werden.

**[0020]** Darüber hinaus ist es möglich, mittels eines Vektormodells Messkopfbewegungen durch vektorielle Bestimmung des Gierens, des Nickens oder des Rollens des Messkopfes an der Messkopfführungsvorrichtung zu erfassen. Dabei bedeutet ein Gieren ein Schwenken des Messkopfes um seine Hochachse, ein Nicken bedeutet ein Schwenken des Messkopfes um seine Querachse und ein Rollen ergibt sich beim Schwenken des Messkopfes um seine Längsachse.

**[0021]** Weiterhin ist es möglich, ein Ermitteln von lokalen Steigungen der Messobjektoberfläche durch Höhendifferenzbildung zwischen  $i$  Messspots und Aufintegrieren der Gesamtheit der lokalen Steigungen zu einer Oberflächentopographie durchzuführen. Dieses differentielle Abtastverfahren misst Wegunterschiede zwischen zwei Messspots eines Messkopfes mit einem Faserende und den Messspots zweier Fokussierlinsen. Dabei wird mittels Spektralinterferometrie (OCT) der optische Wegunterschied zu den beiden Messspots gemessen und daraus eine Oberflächentopographie abgeleitet.

**[0022]** Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine optische Präzisionsmessvorrichtung zum Erfassen einer Oberflächentopographie eines Messobjektes insbesondere im Nanometerbereich. Dazu weist die Präzisionsmessvorrichtung eine Vorrichtung mit einem Messkopf in einer Messkopfführungsvorrichtung für eine chromatisch-konfokale Erfassung der Oberflächentopographie oder für eine spektralinterferometrische OCT Abstandserfassung zu der Oberflächentopographie auf. In der Messvorrichtung können  $i$  spektral breitbandige Lichtquellen vorgesehen werden, die über  $i$  Y-Koppler  $i$  Fasern mit breitbandigem Licht versorgen. Auch ist es möglich, mit einer einzigen breitbandigen Lichtquelle über einen 1Xi-Koppler und dann weiteren  $i$  Y-Kopplern  $i$  Fasern mit breitbandigem Licht zu versorgen.

**[0023]** Ein Faserarray mit den  $i$  Fasern für  $i$  Messkanäle ist in dem Messkopf angeordnet. Ferner ist eine gemeinsame Messkopfoptik, die das Spotarray mit  $i$  Messspots auf dem Messobjekt ausbildet, im Messkopf vorhanden. Weiterhin sind Mittel zum Erfassen und Digitalisieren von  $i$  Reflektionsspektren der  $i$  Messkanäle in  $i$  Spektrometern vorgesehen. Ferner verfügt die optische Präzisionsmessvorrichtung über eine Auswerteeinheit für die digitalisierten  $i$  Reflektionsspektren zum Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung. Bei dieser optischen Präzisionsmessvorrichtung bewegt sich der Messkopf an einer Messkopfführungsvorrichtung auf einem linearen Sollweg.

**[0024]** Neben einer Option zum mehrkanaligen Detektieren mit  $i$  Spektrometern kann auch ein Spektrometer mit einem Faserarray-Input und über Auslesen von mehreren Spektren mit einer Matrix-CCD erfolgen. Außerdem ist es möglich, wie unten in Bezug auf eine Ausführungsform beschrieben ein einzelnes Spektrometer mit zeitlichem Kanalmultiplexing zu verwenden. Alternativ zum Zeitmultiplexer können auch mehrere Messkanäle in einem Spektrum zusammengefasst werden. Dafür wird der Messkopf derart gestaltet, dass die Abstandswerte der Kanäle eine feste Rangfolge einnehmen, indem der kleinste Wert immer von Kanal 1, der nächstgrößere Wert von Kanal 2 und so weiter erfasst wird. Diese Methode ist sowohl für eine chromatisch-konfokale Messung mit spektraler Peakposition als auch für eine OCT-Messung mit Peakposition in einer Fouriertransformation des entzerrten Spektrums durchführbar.

**[0025]** Eine Führungsvorrichtung kann jedoch auch für das Messobjekt vorgesehen werden, mit dem das Messobjekt unter einem feststehendem Messkopf entlanggeführt wird. In beiden Fällen unterliegen die Messkopfführungsvorrichtungen mit ihren beweglichen Komponenten Abweichungsbewegungen gegenüber der Sollwertlage. Auch können Systemfehler wie Neigungen des Messkopfes gegenüber der Orthogonalen zu der

Messobjektoberfläche auftreten, die mithilfe der oben beschriebenen Maßnahmen, beispielsweise durch die Anordnung von drei Messspots in einem gleichschenkligen Dreieck ermittelt werden und entsprechend die Messwerte korrigiert werden können. Anstelle einer Mehrzahl von  $i$  Reflektionsspektren können die  $i$  Messkanäle auch einem Multiplexer zugeführt werden und in einem einzigen Spektrometer erfasst und anschließend digitalisiert werden.

**[0026]** Zum Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung aus den  $i$  Reflektionsspektren weist die optische Präzisionsmessvorrichtung weiterhin nachfolgende Mittel auf. Es werden Mittel vorgesehen, die ausgebildet sind zum Erfassen von geometrischen Abstandswerten der  $i$  Messkanäle zur Zeit  $t(j)$  und Mittel, die ausgebildet sind zum Erfassen von dreidimensionalen Positionswerten für die  $i$  Messspots auf der Messobjektoberfläche zur Zeit  $t(j)$ . Weitere Erfassungsmittel dienen einer Ermittlung einer lokalen Neigung der Messobjektoberfläche relativ zu dem Messkopf. Für das Erfassen der lokalen Neigung weist die Messvorrichtung Mittel auf, die zum Korrigieren von auf der erfassten Neigung basierenden systematischen Messfehlern ausgebildet sind. Weiterhin sind Mittel vorgesehen, die ausgebildet sind zum Erstellen von lokalen Topographien für die redundanten  $i$  Messkanäle.

**[0027]** Schließlich sind Mittel ausgebildet zum Korrelieren der lokalen Topographien unter Separieren der wahren Oberflächentopographie von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung durch Separieren einer Holprigkeit einer Position und einer Holprigkeit einer Orientierung des Messkopfes in der Messkopfführungsvorrichtung. Schließlich sind Mittel vorgesehen, die zur Ausgabe einer bereinigten Oberflächentopographie ausgebildet sind und weitere Mittel, die ausgebildet sind zur Ausgabe einer realen Bahn und einer realen Orientierung der Messkopfführungsvorrichtung.

**[0028]** Diese vorgenannten Mittel sind zusammengefasst in der Auswerteeinheit, um aus den  $i$  Referenzspektren  $i$  reale Messwerte an  $i$  Stellen auf dem Messobjekt zu ermitteln und Messsystemfehler und Bewegungsabweichungen von dem realen Präzisionsmesswert zu separieren, um einen Messwert im Nanobereich zu extrahieren. Somit wird in vorteilhafter Weise ein äußerst präziser Messwert mithilfe dieser Präzisionsmessvorrichtung aus den gemessenen Rohdaten der  $i$  Spektrometer herausgeschält, wobei gleichzeitig die Schale bereits einen realen Wert für die Größe der Messsystemfehler und für die Größe der Abweichungsbewegungen der Messführungsvorrichtung liefert.

**[0029]** Die Erfindung wird nun anhand der beigefügten Figuren näher erläutert.

**[0030]** Fig. 1 zeigt schematisch ein Flussdiagramm eines optischen Messverfahrens zum Erfassen einer Oberflächentopographie gemäß eines Durchführungsbeispiels der Erfindung;

**[0031]** Fig. 2 zeigt schematisch ein Blockdiagramm einer Auswerteeinheit einer Messvorrichtung zum Präzisionsmessen;

**[0032]** Fig. 3 zeigt ein Messergebnis einer Kalibrierfahrt für einen chromatisch-konfokalen Messkopf;

**[0033]** Fig. 4 zeigt eine Prinzipskizze einer Messvorrichtung zum Messen einer Oberflächentopographie gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung;

**[0034]** Fig. 5 zeigt eine Prinzipskizze einer Messvorrichtung zum Messen einer Oberflächentopographie gemäß einer zweiten Ausführungsform der Erfindung.

**[0035]** Fig. 1 zeigt schematisch ein Flussdiagramm **50** eines optischen Messverfahrens im Nanometerbereich zum Erfassen einer Oberflächentopographie gemäß eines Ausführungsbeispiels der Erfindung. Dazu wird das optische Messverfahren mit dem Startblock **100** gestartet.

**[0036]** In dem Verfahrensschritt **101** wird eine Messvorrichtung mit einem Messkopf in einer Messkopfführungsvorrichtung für eine für eine chromatisch-konfokale Erfassung der Oberflächentopographie oder für eine spektralinterferometrische OCT Abstandserfassung zu der Oberflächentopographie bereitgestellt und ein Messkopf in der Messkopfführungsvorrichtung über das Messobjekt gefahren. Es schließt sich der Verfahrensschritt **102** an, bei dem ein Aufbringen von spektral breitbandigem Licht einer Lichtquelle aus einem Faserarray mit  $i$  Fasern von  $i$  Messkanälen über eine gemeinsame Messkopfoptik unter Ausbilden eines Spotarrays aus  $i$  Messspots auf das Messobjekt beim Führen des Messkopfes über das Messobjekt durchgeführt wird. Dabei werden Positionswerte der Aktorik und die Messwerte der  $i$  Messkanäle mit einem Zeitstempel versehen und aufgezeichnet.

**[0037]** Die Positionswerte der Aktorik können dabei wie folgt ermittelt werden:

- a) Es wird ein Zielwert für die gesteuerte Messkopffposition, gegebenenfalls unter Berücksichtigung von reproduzierbaren Bahnabweichungen, die in einer Kalibrierfahrt ermittelt wurden, eingesetzt.
- b) Es werden reale mit Encodern gemessene Positionswerte von Aktorikelementen eingesetzt. Dabei basieren Encoderwerte auf Glasmaßstäben oder Dehnungsmessstreifen oder optischen Interferometern.
- c) Es werden Messwerte von Beschleunigungssensoren aufintegriert und mit den unter a) und b) ermittelten Positionswerten korreliert.
- d) Es werden direkt Abstandsdifferenzen zwischen zwei Messpunkten gemessen und zu einer Topographie, die nicht durch Sprünge des Messkopfes verfälscht wird, aufintegriert.

**[0038]** Im Verfahrensschritt **103** erfolgt ein Erfassen und Digitalisieren von  $i$  Reflektionsspektren der  $i$  Messkanäle. Schließlich erfolgt in der mit einer strichpunktieren Linie umrandeten Box ein mehrgliedriger Verfahrensschritt **104** zum Auswerten der digitalisierten Reflektionsspektren unter Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung.

**[0039]** Dieses Auswerten in dem Verfahrensschritt **104** umfasst einen Verfahrensschritt **105** zum Erfassen von geometrischen Abstandswerten der  $i$  Messkanäle zur Zeit  $t(j)$ . Der nachfolgende Verfahrensschritt **106** liefert ein Erfassen von dreidimensionalen Positionswerten für die  $i$  Messspots auf der Messobjekttoberfläche zur Zeit  $t(j)$ . Nun kann der Verfahrensschritt **107** folgen, bei dem ein Erfassen einer lokalen Neigung der Messobjekttoberfläche relativ zu dem Messkopf erfolgt, und dann kann das Auswerteverfahren übergehen in den Verfahrensschritt **108**, bei dem ein Korrelieren von auf der erfassten Neigung basierenden systematischen Messfehlern durchgeführt wird.

**[0040]** Der Verfahrensschritt **109** dient einem Erstellen von lokalen Topographien für die redundanten  $i$  Messkanäle. An diesen Schritt schließt sich der Verfahrensschritt **110** mit einem Korrelieren der lokalen Topographien an, bei dem ein Separieren von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung durch Separieren einer Holprigkeit einer Sensorwahl und einer Holprigkeit einer Sensororientierung des Messkopfes in der Messkopfführungsvorrichtung von der wahren Oberflächentopographie erfolgt. Schließlich wird im Verfahrensschritt **111** eine bereinigte Oberflächentopographie und eine reale Bahn und Orientierung der Messkopfführungsvorrichtung des Messkopfes ausgegeben, so dass mit dem Verfahrensschritt **112** das Verfahren beendet werden kann.

**[0041]** Fig. 2 zeigt schematisch ein Blockdiagramm **60** einer Auswerteeinheit **20**, die in einer Messvorrichtung zum Präzisionsmessen in einem Nanometerbereich erforderlich ist. Die Auswerteeinheit **20** erfasst in einem ersten Block ein Mittel **21**, das ausgebildet ist zum Erfassen von geometrischen Abstandswerten der  $i$  Messkanäle zur  $t(j)$ . Das Mittel **21** dieses Blockes wirkt zusammen mit Mitteln **22** und **23**, wobei das Mittel **22** ausgebildet ist zum Erfassen von dreidimensionalen Positionswerten für die  $i$  Messspots auf der Messobjekttoberfläche zur Zeit  $t(j)$ , und das Mittel **23** in dem benachbarten Block zum Erfassen einer lokalen Neigung der Messobjekttoberfläche relativ zu dem Messkopf ausgebildet ist.

**[0042]** Von dem Mittel **23** geht es über zu einem Block mit dem Mittel **24**, das ausgebildet ist, unter Korrelation von zeitlichen Mustern ein Zuordnen der erfassten Neigung zu systematischen Messfehlern durchzuführen. Das Mittel **25** ist ausgebildet, beim Erstellen von lokalen Topographien für die redundanten  $i$  Messkanäle die Messfehler zu berücksichtigen.

**[0043]** Vom Mittel **25** geht es über zu dem Block mit dem Mittel **26**, das ausgebildet ist zum Korrelieren der lokalen Topographien unter Separieren von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung durch Separieren einer Holprigkeit einer Sensorbahn und einer Holprigkeit einer Sensororientierung des Messkopfes in der Messkopfführungsvorrichtung von der wahren Oberflächentopographie. Schließlich werden von dem Mittel **26** ausgehend zwei Ausgabeblöcke versorgt, einmal mit dem Mittel **27**, das ausgebildet ist zur Ausgabe einer bereinigten Oberflächentopographie, sowie einem weiteren Block mit dem Mittel **38**, das ausgebildet ist zur Ausgabe einer realen Bahn und einer realen Orientierung der Messkopfführungsvorrichtung.

**[0044]** Fig. 3 zeigt das Messergebnis einer Kalibrierfahrt für einen chromatisch-konfokalen Messkopf. Der Messkopf der Messvorrichtung, wie es die nachfolgenden Fig. 4 und Fig. 5 zeigen, ist bei dieser Kalibrierfahrt auf ein Planglas gerichtet, das auf einem Lineartisch montiert ist. Der relative Abstand des Planglases zum Messkopf kann mit einem Kontrollinterferometer mit nm (Nanometer) Genauigkeit gemessen werden. Mit der Kalibrierfahrt wird der Zusammenhang zwischen Spektrometersignal in Form der Peakposition des spektralen Maximums und dem Abstand bestimmt, wobei dies im gesamten Spektralbereich des Spektrometers durchge-

führt wird. Damit wird die Kennlinie "Abstand über Pixelposition" bestimmt, die für die Kombination aus Spektrometer und Messkopf gültig ist.

**[0045]** Das in **Fig. 3** gezeigte Diagramm liefert die Abweichung des Istwertes vom Erwartungswert bei zwei Wiederholungsmessungen. Dazu ist ein Bereich von  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  Abweichung über einen Messbereich von  $100 \mu\text{m}$  (Mikrometern) gezeigt. Aus diesem Diagramm gemäß **Fig. 3** sind folgende Effekte sichtbar. Die gestrichelte Kurve a liegt generell um einige Nanometer tiefer als die durchgezogene Kurve b, was einer Langzeitdrift des Arbeitsabstandes zum Beispiel durch Temperatureinfluss entspricht. Die Kurven zeigen eine grobe Welligkeit von  $\pm 10 \text{ nm}$  im Vergleich zur Kalibrierfahrt der Langzeitdrift des Messbereichs, wie es die punktierte Kurve c zeigt. Die beiden Kurven a und b haben eine dominierende Periodizität von  $2 \mu\text{m}$  und sind ziemlich eng zueinander korreliert. Zur Ermittlung einer Kennlinie, wie die punktierte Kennlinie c, kann ein glättendes Filter angewendet werden, das solche feinwelligen Periodizitäten entfernt. Derartige Periodizitäten können durch Kippbewegungen der Fahrachse, durch unterschiedliche Abstandsänderung am Kontrollinterferometer oder auch am Messkopf entstehen oder können ein systematisches Verhalten des Messkopfes bzw. der Auswertereinheit darstellen, das bei der Erstellung der Kennlinie weggeglättet würde.

**[0046]** Restliche feinwellige Abweichungen zwischen den beiden Kurven a und b sind teilweise auf Messwertrauschen, teilweise auf sonstige Vibrationen und auf Fluktuationen des Messaufbaus und der Kontrollinterferometer-Abstandsmessung zurückzuführen. Mit dem vorher erörterten Verfahren anhand der **Fig. 1** und **Fig. 2** und der nachfolgenden Messvorrichtungen **3** und **40** ist es nun möglich, an einer Profilmessung in Nanometerpräzision diese verschiedenen Störeinflüsse, nämlich die Langzeitdrift, die systematischen Messfehler des Abstandssensors, die Positionierfehler der Stellachsen und der Vibrationen des Messobjektes sowie das Messwertrauschen voneinander zu unterscheiden und aus dem Profil des Messobjektes herauszurechnen.

**[0047]** Dazu wird erfindungsgemäß ein optischer Messkopf mit mehreren Messkanälen bereitgestellt, wie es die nachfolgenden **Fig. 4** und **Fig. 5** zeigen, wobei die Foki der Spots der Messkanäle mindestens entlang einer Scannrichtung angeordnet sind, die als Hauptlinie bezeichnet wird. Bei dem Scann bzw. der Abtastung wird das Profil des Messobjektes in jedem Messkanal gemessen und die Gesamtheit der zeit- und positionsversetzt angeordneten Profile mithilfe von Korrelationsmethoden zu einem mittleren Gesamtprofil zusammengesetzt.

**[0048]** Da die Profilabweichungen in den einzelnen Kanälen durch zeitliche und räumliche Bewegungsmuster in allen Profilen gleichartig sein sollen, können aus den Profilen Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung sowie systematische Messfehler herausgerechnet werden, und ein statistisches Rauschen kann durch mehrere Messungen der bereinigten Oberflächentopographie verringert werden. Dabei kann bereits die Bereitstellung von mindestens einem zusätzlichen Messkanal quer zur Hauptlinie, wie es beispielsweise in den nachfolgenden **Fig. 4A** bis **Fig. 4C** bzw. **Fig. 5A** bis **Fig. 5C** gezeigt wird, dazu dienen, Kippbewegungen des Messkopfes an der Messkopfführungsvorrichtung zu messen und herauszurechnen.

**[0049]** Auch können lokale Steigungen der Oberfläche berechnet werden, um damit systematische Messfehler des Messkopfes herauszurechnen, die von der Neigung der Objektoberfläche abhängen. Dazu kann beispielsweise die Phasenlage des Messsignals von zwei Kanälen bereits berechnet werden und damit eine Differenzphase bestimmt werden. Die Differenzphase kann wiederum in eine lokale Höhendifferenz als Steigung zwischen zwei Messpunkten umgerechnet werden. Zusätzlich können weitere Messkanäle interferometrisch überlagert werden, um den optischen Wegunterschied, welcher der Differenzphase entspricht, zu messen. Aus der Gesamtheit der lokalen Steigungen kann dann eine Topographie aufintegriert werden. Diese differentielle Abtastung steht in Konkurrenz zu einer absoluten Topographieerfassung, die aus der idealen Astorikbahn und den gemessenen Abstandswerten gewonnen wird.

**[0050]** Diese Fehlerkorrekturmethode funktioniert auch bei stark geneigten Oberflächen, wenn die Qualität der spektralinterferometrischen Abstandsmessung durch Abstandsänderung beeinträchtigt wird. Somit wird hier eine robuste Messung für eine chromatisch-konfokale Erfassung der Oberflächentopographie bereitgestellt.

**[0051]** Um einen Messsystemfehler in Bezug auf eine Neigung des Messkopfes gegenüber der Orthogonalen der Messobjektoberfläche herauszurechnen, reicht wie oben erwähnt bereits ein quer zur Hauptlinie angeordneter Messspot aus. Jedoch kann die Neigung bzw. der Neigungswinkel noch genauer ermittelt werden, wenn anstelle des einen quer liegenden Messspots drei Messspots zur Hauptlinie derart angeordnet werden, dass sie ein gleichseitiges Dreieck wie in den nachfolgenden **Fig. 4A** und **Fig. 5A** bilden, wobei durch Aufstellen des Normalenvektors des Dreiecks ein Herausrechnen beliebiger Neigungen ermöglicht wird.

**[0052]** Neben der Abweichung durch einen Neigungswinkel, der einem Schwenk- oder Drehrichtungswinkel um eine Längsachse in Fahrtrichtung gleichgesetzt werden kann und auch als Rollwinkel  $\Phi$  bezeichnet wird, gibt es weitere Orientierungsabweichungen, die als Nicken bezeichnet werden und einen Drehwinkel  $\theta$  um die Querachse der Messkopfführungsvorrichtung oder des Messkopfes kennzeichnen. Als dritte räumliche Drehrichtung ist ein Gieren möglich und als Drehwinkel  $\Psi$  um die Hochachse bekannt. Die drei Raumwinkel der Orientierungsabweichungen beim Scannen, nämlich  $\Psi$ ,  $\theta$  und  $\Phi$ , sind auch als Eulerwinkel oder als Lagewinkel bekannt.

**[0053]** Für die Orientierungsabweichung setzt sich dann die Transformationsmatrix aus den drei Einzeldrehmatrizen für die jeweiligen Winkel zusammen. Dabei ist die Drehreihenfolge in der Reihenfolge  $\Psi$ ,  $\theta$  und  $\Phi$  in der nachfolgenden Transformationsmatrize angegeben.

$$M_{fg} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \\ 0 & -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Theta & 0 & -\sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \Theta \cos \Psi & \cos \Theta \sin \Psi & -\sin \Theta \\ \sin \Phi \sin \Theta \cos \Psi - \cos \Phi \sin \Psi & \sin \Phi \sin \Theta \sin \Psi + \cos \Phi \cos \Psi & \sin \Phi \cos \Theta \\ \cos \Phi \sin \Theta \cos \Psi + \sin \Phi \sin \Psi & \cos \Phi \sin \Theta \sin \Psi - \sin \Phi \cos \Psi & \cos \Phi \cos \Theta \end{pmatrix}$$

**[0054]** In linearisierter Form mit in Bogenmaß angegebenen Winkeln hat dann die Transformationsmatrix folgende Form:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & \Psi & -\Theta \\ -\Psi + \Phi * \Theta & 1 + \Phi * \Theta * \Psi & \Phi \\ \Theta & -\Phi + \Theta * \Psi & 1 \end{bmatrix}$$

**[0055]** Wenn die Produktterme vernachlässigt werden, was bei guter Aktorik der Messkopfführungsvorrichtung möglich ist, ergibt sich die vereinfachte Drehmatrix:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & \Psi & -\Theta \\ -\Psi & 1 & \Phi \\ \Theta & -\Phi & 1 \end{bmatrix}$$

**[0056]** Somit kann eine Einheitsmatrix plus eine antisymmetrische Matrix in den drei Eulerwinkeln als Vektormodelle der Orientierungsabweichungen zugrunde gelegt werden.

**[0057]** Dabei ist zu beachten, dass derartige Aktuatoren bzw. Messkopfführungsvorrichtungen häufig eine Kopplung zwischen Bahnabweichungen und Orientierungsabweichungen darstellen. Bei einer starren Führung ergibt sich für eine wellige Bahn ein  $z(x)$  oder auch ein welliger Verlauf der Orientierung mit dem Nickwinkel  $\theta$ . Bei starrer Führung folgt der Messkopf immer parallel zur Führung, so dass  $\theta$  (Theta) der Steigung der Messkopfführungsvorrichtung entspricht, mit:

$$\Theta(x) = (d/dx)z(x)$$

**[0058]** Ein Messkopf, der starr an einer derartigen Messkopfführung befestigt ist, macht demnach die Orientierungsänderungen im Verhältnis 1:1 mit, so dass seine Bahn  $r1(x)$  der Bahn  $r0(x)$  eines Auflagepunktes gemäß

$$r_1(x) = r_0(x) + D(x) \cdot R_1$$

folgt, so dass die relative Bahnabweichungsbewegung

$$r_1(x) - r_0(x) = D(x) \cdot R_1$$

beträgt.

**[0059]** Die Bewegung des Auflagepunkts ist demnach vollständig beschrieben durch:

- $z(x)$  bzw.  $\Theta(x)$
- $y(x)$  bzw.  $\Psi(x)$
- $\Phi(x)$

**[0060]** Die fehlenden Winkel einer derartigen Drehmatrix sind:

$$\Theta(x) = (d/dx)z(x)$$

$$\Psi(x) = (d/dx)y(x)$$

**[0061]** Der Bahnparameter ist bei der Präzisionsmessvorrichtung nicht  $x$ , sondern die Zeit  $t = x/v$ , was dem gefahrenen Weg  $s$  entspricht.

**[0062]** Wenn also der Hebelvektor  $R_1$  zwischen Auflage- und Messpunkt bekannt ist, kann aus der Orientierung am Messpunkt auf den Positionsfehler am Messpunkt geschlossen werden.

**[0063]** Wenn keine starre Führung für die Messkopfführungsvorrichtung vorliegt, sondern eine gefederte Führung mit einer gewissen Verzögerung und einer gewissen Dämpfung, gilt die Bewegungsgleichung für eine erzwungene gedämpfte Schwingung mit einer Auslenkung von  $x(t)$ .

$$Mx''(t) + iM\omega_0 x'(t) + M\omega_0^2 x(t) = F(t)$$

mit der Zwangskraft

$$F(t) = Mx_0(t)''$$

**[0064]** Dabei steht  $F'$  für die Ableitung von  $F$  nach der Zeit  $t$ .

**[0065]** Das bedeutet, dass bei einer gefederten Führung des Messkopfes an der Messkopfführungsvorrichtung die Antwort auf eine Führungswelligkeit phasenverschoben und mit veränderter Amplitude erfolgt. Dabei sind Parameter der Federung die Resonanzfrequenz  $\omega_0$  und die Dämpfung.

**[0066]** Für langwellige Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung bzw. des Messkopfes wird diese Abweichungsbewegung im Verhältnis 1:1 übertragen. Liegt die Abweichungsbewegung nahe einer Resonanzfrequenz, so führt dieses zu mehr oder weniger stark überhöhten Abweichungsbewegungen mit einer ca. 90° Phasenverschiebung. Jedoch bei kurzwelligen Abweichungsbewegungen werden diese wegintegriert.

**[0067]** Somit gibt eine Messfahrt mit Frequenzanalyse der gemessenen Abstandswerte Aufschluss über die Eigenschwingungen der Aktorik und der Messkopfhaltung der Messkopfführungsvorrichtung. Eine nicht-optimale Regelung der Scannfahrt kann sogar zu resonanten Abweichungsbewegungen führen. Dabei kann die Amplitude einer resonanten Abweichungsbewegung von der Position des Messkopfes bezüglich einer Teil-Aktorik abhängen.

**[0068]** Laterale Abweichungsbewegungen werden jedoch erst sichtbar, wenn auf strukturierten Objekten gemessen wird. Ein gerades Linienraster sieht dann wellig aus. Auf einem senkrechten Planspiegel ist ein Schwenken um die Hochachse bzw. ein Gieren wie oben bereits erörtert nicht feststellbar. Jedoch sind Abweichungsbewegungen in axialer Richtung gut sichtbar, so dass ein Nicken um die Querachse und ein Rollen um die Längsachse zu Welligkeiten in der scheinbaren Topographie führen. Durch die erfindungsgemäße Mehrkanalmessung werden somit ein Nicken und ein Rollen, verursacht durch die Messkopfführungsvorrichtung, unterscheidbar.

**[0069]** Weitere Korrekturmöglichkeiten ergeben sich dadurch, dass redundante Messpunkte, wie sie in den nachfolgenden **Fig. 4A**, **Fig. 4B** und **Fig. 4C** sowie **Fig. 5A**, **Fig. 5B** und **Fig. 5C** gezeigt werden, mit ihren Abständen zueinander unterschiedlich angeordnet werden. Damit kann vermieden werden, dass periodische Schwankungen der Topographie mit einer Periodendauer kleiner als

$$T_1 = \text{Abstand}_1 / \text{Fahrgeschwindigkeit},$$

nicht als unterabgetastete Raumfrequenzen wahrgenommen werden. Der Vergleich mit einem Messpunkt mit Abstand  $2 > \text{Abstand } 1$  zeigt sofort den Unterschied.

**[0070]** Außerdem ist es möglich, auch ungleich frequente Messpunkte einzusetzen, um eine Unterabtastung im zeitlichen Bereich zu erkennen. Dazu muss lediglich eine zeitliche Abtastung mit zwei unterschiedlichen Taktraten erfolgen.

**[0071]** Darüber hinaus ist es möglich, eine Kompensation von Messfehlern durch Objektneigung zu erzielen. Dazu wird eine Kalibrierung des Messkopfs durch Abstandsmessung auf einer Präzisionskugel vorgenommen. Die Abweichung der gemessenen Topographie von der Sollform wird dann bestimmt und es wird eine Tabelle über Abweichungen in Bezug auf Objektneigungen erstellt. Dazu wird vorzugsweise der Messkopf mindestens drei Messpunkte, wie es die nachfolgenden **Fig. 4A**, **Fig. 4B**, **Fig. 4C** und **Fig. 5A**, **Fig. 5B**, **Fig. 5C** zeigen, die idealerweise ein gleichseitiges Dreieck bilden, wie es in den nachfolgenden **Fig. 4A** und **Fig. 5A** gezeigt wird, auf dem Messobjekt projizieren, so dass eine lokale Neigung der Objektoberfläche aus einem Normalenvektor des Dreiecks bestimmt werden kann. In einer Messauswertung wird lediglich eine Berechnung einer lokalen Objektneigung durchgeführt, wobei die Korrektur der gemessenen Abstände mithilfe der Tabelle "Abweichung über Objektneigung" erfolgen kann.

**[0072]** Weiterhin können die in **Fig. 3** dargestellten Abweichungen von systematischen Messfehlern bereinigt werden, indem Lateralbewegungen des Messkopfes durch Beschleunigungssensoren erfasst werden. Die Beschleunigungssensoren messen die Bewegung des Messkopfs gegenüber dem Raum, und zwar quer zur optischen Achse (in x- und y-Richtung), und integrieren diese Beschleunigung auf zu einer Bahnabweichung  $dx(t)$  und  $dy(t)$ . Dies kann auch in z-Richtung erfolgen. Dabei misst der Multikanal-Messkopf, wie er in den **Fig. 4** und **Fig. 5** gezeigt wird, die lokale Objektneigung. Die Korrektur der Messpunkte kann einerseits durch Interpolation der Objektoberfläche auf Punkte, die auf der Sollbahn liegen, erfolgen und damit eine Korrektur der Abstandswerte ermöglicht werden oder es kann eine Angabe der Oberflächenkoordinaten (x, y und z) mit der gemessenen Bahn  $X = X_{\text{soll}} + dX$  anstelle der Soll-Bahn  $X_{\text{soll}}(t) = [x_{\text{soll}}(t), y_{\text{soll}}(t)]$  erfolgen.

**[0073]** Eine Vibration mit der Amplitude  $x_0$  und der Frequenz  $f$  bringt eine Amplitude der Beschleunigung von:

$$a_0 = x_0 \cdot \omega^2 \\ = 4\pi^2 \cdot x \cdot f^2$$

mit  $\omega = 2\pi \cdot f$ . Der Umrechnungsfaktor für die Umrechnung der Beschleunigung  $a$  als Vielfaches der Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  ergibt sich dann zu

$$F = 4\pi^2 / (9,81 \text{ m/s}^2) / (1 \mu\text{m}) / (1 \text{ Hz})^2 = 4,02 \cdot 10^{-6}$$

und somit wird:

$$A_0(\text{in } g) = x_0(\text{in } \mu\text{m}) \cdot f(\text{in } \text{Hz})^2 \cdot 4 \text{ Millionstel}$$

**[0074]** Tabelle der Beschleunigung bei typischen Vibrationen in Vielfachen der Erdbeschleunigung  $g$

	10 Hz	100 Hz	1000 Hz
1 nm		4e-5	0,004
10 nm		4e-4	0,04
100 nm		0,004	0,4
1 $\mu\text{m}$	4e-4	0,04	4
10 $\mu\text{m}$	0,004	0,4	40

**[0075]** Aus Vibrationen der Orientierung kann auf Vibrationen der Lage zurückgerechnet werden. Dazu werden die mit dem Mehrpunkt-Messkopf gemäß den **Fig. 4** und **Fig. 5** gemessenen Vibrationen der Orientierung nach Anteilen typischer Eigenschwingungen der Aktorik sortiert. Ein geometrisches Modell gibt den Zusammenhang zwischen Messkopforientierung und Messkopfposition relativ zur Aktorik für die Eigenschwingungen an. Dieses wird in einer Kalibrierprozedur ermittelt. Bei der nachfolgenden Messauswertung wird die gemessene Auslenkung der Orientierung, und zwar getrennt nach Eigenschwingungen und basierend auf dem geometrischen Modell, in eine Auslenkung der Messkopfposition umgerechnet. Die so bestimmte Auslenkung der Messkopfposition wird dann zur Korrektur der Koordinaten der gemessenen Punkte auf der Objektoberfläche verwendet.

**[0076]** Um ein Erkennen von unterabgetasteten Welligkeiten zu ermöglichen, kann beispielweise der Abstand der Messpunkte in einer Raumrichtung nicht konstant gehalten werden, damit periodische Welligkeiten in einer Unterabtastung erkennbar werden. Außerdem ist es vorgesehen, wie oben bereits angedeutet, den Messtakt für verschiedene Messpunkte verschieden darzustellen, um damit periodische Welligkeiten in der Unterabtastung ebenfalls erkennbar zu machen.

**[0077]** **Fig. 4** zeigt eine Prinzipskizze einer Messvorrichtung **3** zum Präzisionsmessen einer Oberflächentopographie **1** gemäß einer ersten Ausführungsform einer Präzisionsmessvorrichtung im Nanometerbereich. Dazu weist die Messvorrichtung **3** einen Messkopf **4** in einer Messkopfführungsvorrichtung **5** für eine chromatisch-konfokale Erfassung der Oberflächentopographie **1** oder für eine spektralinterferometrische OCT Abstandserfassung des Abstandes  $e$  zwischen einer Messkopfoptik **10** des Messkopfes **4** und einer Messobjektoberfläche **16** auf.

**[0078]** Der Messkopf **4** kann von einer spektral breitbandigen Lichtquelle, einem sogenannten SOA (solid state optical amplifier) versorgt werden. Vorzugsweise wird jedoch eine aus der SOA-Lichtquelle abgeleitete Superlumineszenzdiode (SLD) eingesetzt. Die Superkontinuum-Lichtquelle der SLD hat mehr Leistung pro Bandbreite. Sie eignet sich daher als Einzellichtquelle, deren Licht per 1Xi-Koppler auf viele Kanäle verteilt werden kann.

**[0079]** Alternativ zu einer breitbandigen Lichtquelle in Zusammenwirken mit einem Zeilenspektrometer ist auch eine wellenlängendurchstimbare Lichtquelle mit zeitsequentieller Aufzeichnung des Spektrums anwendbar. Dabei können jedoch zusätzliche Time-Delay-Effekte auftreten.

**[0080]** In der Ausführungsform gemäß **Fig. 4** wird das breitbandige Licht einer SLD-Lichtquelle **6** in Fasern **8** eines Lichtfaserbündels, das in dieser Ausführungsform beispielhaft vier Lichtleitfasern aufweist, über vier Y-Koppler **28**, **29**, **30** und **31** eingekoppelt. Das breitbandige Licht der SLD-Lichtquelle **6** wird somit auf die vier Lichtleitfasern verteilt und dem Messkopf **4** an der Messkopfführungsvorrichtung **5** zugeleitet.

**[0081]** Faserenden **19** bilden ein Faserarray **7** über einer Messkopfoptik **10** und die Messkopfoptik **10** projiziert ein Spotarray **11** auf einer Messobjektoberfläche **16**, das zurückreflektiert wird und über die Y-Koppler **28**, **29**, **30** und **31** vier Spektrometern **32**, **33**, **34** und **35** zugeführt wird. Die Reflektionsspektren, die in den Spektrometern **32**, **33**, **34** und **35** gebildet werden, können dann von einer Auswerteeinheit **20** dahingehend ausgewertet werden, dass Systemfehler sowie Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung und des Messkopfes von der zu messenden Oberflächentopographie separiert werden.

**[0082]** Um eine derartige Korrektur der Messwerte beim Separieren der Messfehler zu ermöglichen, werden quer zu einem zentralen Messspot **15** auf einer Hauptlinie der Abtastrichtungen  $x$  bzw.  $F$  und  $G$  weitere Messspots **12**, **13** und **14** angeordnet, die das Spotarray **11** bilden, wobei die drei Messspots **12**, **13** und **14** quer zu der Hauptlinie ein gleichseitiges Dreieck bilden, wenn beispielsweise der Neigungswinkel bzw. der Drehwinkel  $\Phi$  um die Längsachse  $x$  der Messkopfführungsvorrichtung **5** Null ist, wie es **Fig. 4A** zeigt.

**[0083]** Ist dieser Neigungs- oder Rollwinkel nicht Null, sondern weicht er von der Nullposition ab, so kann wie **Fig. 4B** zeigt, das Dreieck aus den Messspots **12**, **13** und **14** verzerrt sein. Aus dieser Verzerrung kann beispielsweise über die Abstände der Messspots **12**, **13** und **14** zueinander ein Normalenvektor des Dreiecks und somit ein Neigungswinkel ausgerechnet werden und damit der Messwert für die Oberflächentopographie korrigiert werden. Dazu kann die Neigung des Objektes zur Korrektur von Abstandswerten aller Messpunkte herangezogen werden oder es kann aus lokalen Topographien eine Neigung für jeden Messpunkt bestimmt werden. Während in **Fig. 4B** der Messspot **12** extrem von der Hauptlinie abweicht, zeigt **Fig. 4C** eine andere Verzerrung des gleichseitigen Dreiecks, wie es ursprünglich mit **Fig. 4A** gezeigt wird, bei der sowohl der Messspot **12** als auch der Messspot **13** gegenüber den Positionen eines Rollwinkels von Null verschoben sind.

**[0084]** Dieser Neigungs- oder Rollwinkel  $\Phi$  ist nur ein Beispiel für einen Systemfehler. Gleiches gilt für die anderen beiden Eulerwinkel, nämlich den Gierwinkel  $\Psi$  für eine Drehung um die Hochachse  $z$  und den Nickwinkel  $\theta$  für eine Drehung um die Querachse  $y$ , wie es oben mit Bezug auf das Vektormodell der Abweichungsbewegungen erörtert wurde.

**[0085]** Fig. 5 zeigt eine Prinzipskizze einer Messvorrichtung **40** zum Präzisionsmessen einer Oberflächentopographie **1** gemäß einer zweiten Ausführungsform der Erfindung. Komponenten mit gleichen Funktionen wie in Fig. 4 werden mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet und nicht extra erörtert.

**[0086]** Die Ausführungsform gemäß Fig. 5 unterscheidet sich von der Ausführungsform gemäß Fig. 4 dadurch, dass ein Multiplexer **18** eingesetzt ist, mit dem Messkanäle **9** einem einzigen Spektrometer **32** zeitversetzt zugeführt werden, wobei der Multiplexer **18** dafür sorgt, dass die Vielzahl der in Fig. 4 gezeigten Spektrometer verringert werden kann. Mithilfe des Multiplexers **18** kann auch gleichzeitig auf die in Fig. 4 gezeigten Y-Koppler verzichtet werden, da auch die breitbandige Lichtquelle **6** über den Multiplexer **18** zeitversetzt an die einzelnen Lichtleitfasern angekoppelt werden kann. Ein Vorteil ist, dass die Lichtintensität nicht durch die Anzahl der Lichtleitfasern geteilt wird, sondern jede einzelne Lichtleitfaser die volle Lichtintensität über den Multiplexer **18** erhält.

**[0087]** Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung eignen sich hervorragend zur Vermessung von Oberflächentopographien im Mikrometer- und Nanometerbereich. Im Einzelnen können das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung zur qualitativen und/oder quantitativen Erfassung der Rauigkeit, der Welligkeit, der Ebenheit und der Porosität von metallischen und nichtmetallischen Oberflächen verwendet werden.

**[0088]** Dabei kommen insbesondere die Oberflächen von metallischen Präzisionswerkstücken aus dem Maschinenbau wie beispielsweise Turbinenschaufeln, Kupplungs- und Getriebekomponenten in Betracht.

**[0089]** Ferner können die Oberflächentopographien von optischen Komponenten wie asphärischen Präzisionsglaskörpern qualitativ und quantitativ erfasst werden. Solche Präzisionsglaskörper können dabei mit aufgedampften Mehrschichtsystem aus Metallen und/oder Dielektrika versehen sein.

**[0090]** Darüberhinaus können das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung im Bereich der Medizintechnik, insbesondere dort im Bereich der Ophthalmologie beispielsweise bei der qualitativen und quantitativen Erfassung der Oberflächentopographie einer Hornhaut, verwendet werden.

**[0091]** Obwohl zumindest eine beispielhafte Durchführung des Verfahrens in der vorhergehenden Beschreibung beschrieben wurde, können verschiedene Änderungen und Modifikationen vorgenommen werden. Die genannte Durchführung des Präzisionsverfahrens ist lediglich beispielhaft und nicht dazu vorgesehen, den Gültigkeitsbereich, die Anwendbarkeit oder die Konfiguration in irgendeiner Weise zu beschränken. Vielmehr stellt die vorhergehende Beschreibung dem Fachmann eine Lehre zur Umsetzung zumindest einer Durchführung des Verfahrens beispielhaft zur Verfügung, wobei zahlreiche Änderungen in der Funktion und der Anordnung in weiteren beispielhaften Ausführungsformen einer Messvorrichtung beschriebenen Elementen gemacht werden können, ohne den Schutzbereich der angefügten Ansprüche und ihrer rechtlichen Äquivalente zu verlassen.

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Oberflächentopographie
<b>2</b>	Messobjekt
<b>3</b>	Messvorrichtung
<b>4</b>	Messkopf
<b>5</b>	Messkopfführungsvorrichtung
<b>6</b>	Lichtquelle
<b>7</b>	Faserarray
<b>8</b>	Faser
<b>9</b>	Messkanal
<b>10</b>	Messkopfoptik
<b>11</b>	Spotarray
<b>12</b>	Messspot
<b>13</b>	Messspot

<b>14</b>	Messspot
<b>15</b>	Messspot
<b>16</b>	Messobjektoberfläche
<b>17</b>	gleichseitiges Dreieck
<b>18</b>	Multiplexer
<b>19</b>	Faserende
<b>20</b>	Auswerteeinheit
<b>21</b>	Mittel
<b>22</b>	Mittel
<b>23</b>	Mittel
<b>24</b>	Mittel
<b>25</b>	Mittel
<b>26</b>	Mittel
<b>27</b>	Mittel
<b>28</b>	Y-Koppler
<b>29</b>	Y-Koppler
<b>30</b>	Y-Koppler
<b>31</b>	Y-Koppler
<b>32</b>	Spektrometer
<b>33</b>	Spektrometer
<b>34</b>	Spektrometer
<b>35</b>	Spektrometer
<b>38</b>	Mittel
<b>40</b>	Messvorrichtung (2. Ausführungsform der Erfindung)
<b>50</b>	Flussdiagramm
<b>60</b>	Blockdiagramm
<b>100</b>	Startblock
<b>101</b>	Verfahrensschritt
<b>102</b>	Verfahrensschritt
<b>103</b>	Verfahrensschritt
<b>104</b>	Verfahrensschritt
<b>105</b>	Verfahrensschritt
<b>106</b>	Verfahrensschritt
<b>107</b>	Verfahrensschritt
<b>108</b>	Verfahrensschritt
<b>109</b>	Verfahrensschritt
<b>110</b>	Verfahrensschritt
<b>111</b>	Verfahrensschritt
<b>112</b>	Verfahrensschritt

**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 102008041062 A1 [0002]

## Patentansprüche

1. Optisches Messverfahren zum Erfassen einer Oberflächentopographie (1) eines Messobjektes (2), das folgende Verfahrensschritte aufweist;

- Bereitstellen einer Messvorrichtung (3) mit einem Messkopf (4) in einer Messkopfführungsvorrichtung (5) für eine chromatisch-konfokale Erfassung der Oberflächentopographie (1);
- Aufbringen von spektral breitbandigem Licht einer Lichtquelle (6) aus einem Faserarray (7) mit i Fasern (8) von i Messkanälen (9) über eine gemeinsame Messkopfoptik (10) unter Ausbilden eines Spotarrays (11) aus i Messspots (12 bis 15) auf dem Messobjekt (2);
- Erfassen und Digitalisieren von i Reflektionsspektren der i Messkanäle (9) und Auswerten der digitalisierten Reflektionsspektren unter Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (5).

2. Optisches Messverfahren zum Erfassen einer Oberflächentopographie (1) eines Messobjektes (2), das folgende Verfahrensschritte aufweist;

- Bereitstellen einer Messvorrichtung (3) mit einem Messkopf (4) in einer Messkopfführungsvorrichtung (5) für eine spektralinterferometrische OCT Abstandserfassung zu der Oberflächentopographie (1);
- Aufbringen von spektral breitbandigem Licht einer Lichtquelle (6) aus einem Faserarray (7) mit i Fasern (8) von i Messkanälen (9) über eine gemeinsame Messkopfoptik (10) unter Ausbilden eines Spotarrays (11) aus i Messspots (12 bis 15) auf dem Messobjekt (2);
- Erfassen und Digitalisieren von i Reflektionsspektren der i Messkanäle (9) und Auswerten der digitalisierten Reflektionsspektren unter Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (5).

3. Optisches Messverfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei weiterhin folgende Auswerteschritte zum Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (5) durchgeführt werden:

- Erfassen von geometrischen Abstandswerten (a, b, c) der i Messkanäle zur Zeit t(j);
- Erfassen von dreidimensionalen Positionswerten für die i Messspots auf einer Messobjektsoberfläche (16) zur Zeit t(j);
- Erfassen einer lokalen Neigung der Messobjektsoberfläche (16) relativ zu dem Messkopf (4);
- Korrigieren von auf der erfassten Neigung basierenden systematischen Messfehlern;
- Erstellen von lokalen Topographien für die redundanten i Messkanäle;
- Korrelieren der lokalen Topographien unter Separieren von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (5) durch Separieren einer Holprigkeit einer Sensorbahn und einer Holprigkeit einer Sensororientierung des Messkopfes (4) in der Messkopfführungsvorrichtung (5) von der wahren Oberflächentopographie (1) und
- Ausgabe einer bereinigten Oberflächentopographie (1) und einer realen Bahn und Orientierung der Messkopfführungsvorrichtung (5) des Messkopfes (4).

4. Optisches Messverfahren nach Anspruch 3, wobei zum Erfassen der lokalen Neigung der Messobjektsoberfläche (16) relativ zu dem Messkopf (4) mindestens drei Messspots (12, 13, 14) eines Dreiecks (17) auf die Messobjektsoberfläche (16) projiziert werden.

5. Optisches Messverfahren nach Anspruch 4, wobei zum Erfassen der lokalen Neigung der Messobjektsoberfläche (16) relativ zu dem Messkopf (4) mindestens drei Messspots (12, 13, 14) eines gleichseitigen Dreiecks (17) auf die Messobjektsoberfläche (16) projiziert werden und aus Abstandswerten der Messspots (12, 13, 14) zueinander die Neigung bestimmt wird.

6. Optisches Messverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (5) mittels eines dreidimensionalen Beschleunigungssensors am Messkopf (4) erfasst werden und die Messwerte der Oberflächentopographie (1) entsprechend korrigiert werden.

7. Optisches Messverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei mittels eines Vektormodells Messkopfbewegungen mittels Bestimmung des Gierens, des Nickens und des Rollens des Messkopfes (4) an der Messkopfführungsvorrichtung (5) erfasst werden.

8. Optisches Messverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 4, wobei ein differentielles Abtastverfahren eingesetzt wird, das die Verfahrensschritte aufweist:

- Ermitteln von lokalen Steigungen der Messobjektoberfläche (**16**) mittels Höhendifferenzbildung zwischen  $i$  Messspots (**12 bis 15**) und
- Aufintegrieren der Gesamtheit der lokalen Steigungen zu einer Oberflächentopographie (**1**).

9. Optisches Messverfahren nach Anspruch 8, wobei das differentielle Abtastverfahren Wegunterschiede zwischen zwei Messspots eines Messkopfes (**4**) mit einem Faserende und den Messspots (**12, 13**) zweier Fokussierlinsen erfasst, und wobei mittels Spektralinterferometrie (OCT) der optische Wegunterschied zu den beiden Messspots (**12, 13**) gemessen wird.

10. Optisches Messverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei in einer Linie in Abtastrichtung angeordnete Messspots (**13, 14**) in unterschiedlichen Abständen angeordnet werden.

11. Optisches Messverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei zeitlich aufeinander folgende Abtastimpulse in unterschiedlichen Zeitabständen erfolgen.

12. Optisches Messverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die zeitliche Abtastung der Messspots (**13, 14**) mit unterschiedlichen Taktraten erfolgt.

13. Optische Messvorrichtung zum Erfassen einer Oberflächentopographie (**1**) eines Messobjektes (**2**) aufweisend:

- eine Messvorrichtung (**3**) mit einem Messkopf (**4**) in einer Messkopfführungsvorrichtung (**5**) für eine chromatisch-konfokale Erfassung der Oberflächentopographie (**1**),
- eine spektral breitbandige Lichtquelle (**6**), die über  $i$  Y-Koppler (**28, 29, 30, 31**)  $i$  Fasern (**8**) mit breitbandigem Licht versorgt,
- ein Faserarray (**7**) mit den  $i$  Fasern (**8**) für  $i$  Messkanäle (**9**), das in dem Messkopf (**4**) angeordnet ist,
- eine Messkopfoptik (**10**), die ein Spotarray (**11**) mit  $i$  Messspots (**12, 13, 14, 15**) auf dem Messobjekt (**2**) ausbildet;
- Mittel zum Erfassen und Digitalisieren von  $i$  Reflektionsspektren der  $i$  Messkanäle (**9**) in  $i$  Spektrometern (**32, 33, 34, 35**) und
- eine Auswerteeinheit (**20**) für die digitalisierten  $i$  Reflektionsspektren zum Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (**5**).

14. Optische Messvorrichtung zum Erfassen einer Oberflächentopographie (**1**) eines Messobjektes (**2**) aufweisend:

- eine Messvorrichtung (**3**) mit einem Messkopf (**4**) in einer Messkopfführungsvorrichtung (**5**) für eine spektralinterferometrische OCT Abstandserfassung zu der Oberflächentopographie (**1**),
- eine spektral breitbandige Lichtquelle (**6**), die über  $i$  Y-Koppler (**28, 29, 30, 31**)  $i$  Fasern (**8**) mit breitbandigem Licht versorgt,
- ein Faserarray (**7**) mit den  $i$  Fasern (**8**) für  $i$  Messkanäle (**9**), das in dem Messkopf (**4**) angeordnet ist,
- eine gemeinsame Messkopfoptik (**10**), die ein Spotarray (**11**) mit  $i$  Messspots (**12, 13, 14, 15**) auf dem Messobjekt (**2**) ausbildet;
- Mittel zum Erfassen und Digitalisieren von  $i$  Reflektionsspektren der  $i$  Messkanäle (**9**) in  $i$  Spektrometern (**32, 33, 34, 35**) und
- eine Auswerteeinheit (**20**) für die digitalisierten  $i$  Reflektionsspektren zum Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (**5**).

15. Optische Messvorrichtung nach Anspruch 13 oder 14, wobei die  $i$  Messkanäle (**9**) über einen Multiplexer (**18**) mit einem Spektrometer (**32**) in Verbindung stehen.

16. Optische Präzisionsmessvorrichtung nach Anspruch 15, wobei der Messkopf derart gestaltet ist, dass die Abstandswerte der Kanäle eine feste Rangfolge einnehmen.

17. Optische Präzisionsmessvorrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 16, die weiterhin folgende Mittel zum Herausrechnen von systematischen Messfehlern und von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (**5**) aus den  $i$  Reflektionsspektren aufweist:

- Mittel (**21**) ausgebildet zum Erfassen von geometrischen Abstandswerten der  $i$  Messkanäle (**9**) zur Zeit  $t(j)$ ;
- Mittel (**22**) ausgebildet zum Erfassen von dreidimensionalen Positionswerten für die  $i$  Messspots (**12 bis 15**) auf der Messobjektoberfläche (**16**) zur Zeit  $t(j)$ ;
- Mittel (**23**) ausgebildet zum Erfassen einer lokalen Neigung der Messobjektoberfläche (**16**) relativ zu dem Messkopf (**4**);

- Mittel (24) ausgebildet zum Korrigieren von auf der erfassten Neigung basierenden systematischen Messfehlern;
- Mittel (25) ausgebildet zum Erstellen von lokalen Topographien für die redundanten i Messkanäle (9);
- Mittel (26) ausgebildet zum Korrelieren der lokalen Topographien unter Separieren von Abweichungsbewegungen der Messkopfführungsvorrichtung (5) durch Separieren einer Holprigkeit einer Sensorbahn und einer Holprigkeit einer Sensororientierung des Messkopfes (4) in der Messkopfführungsvorrichtung (5) von der wahren Oberflächentopographie und
- Mittel (27) ausgebildet zur Ausgabe einer bereinigten Oberflächentopographie (1) sowie
- Mittel (38) ausgebildet zur Ausgabe einer realen Bahn und einer realen Orientierung der Messkopfführungsvorrichtung (5).

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

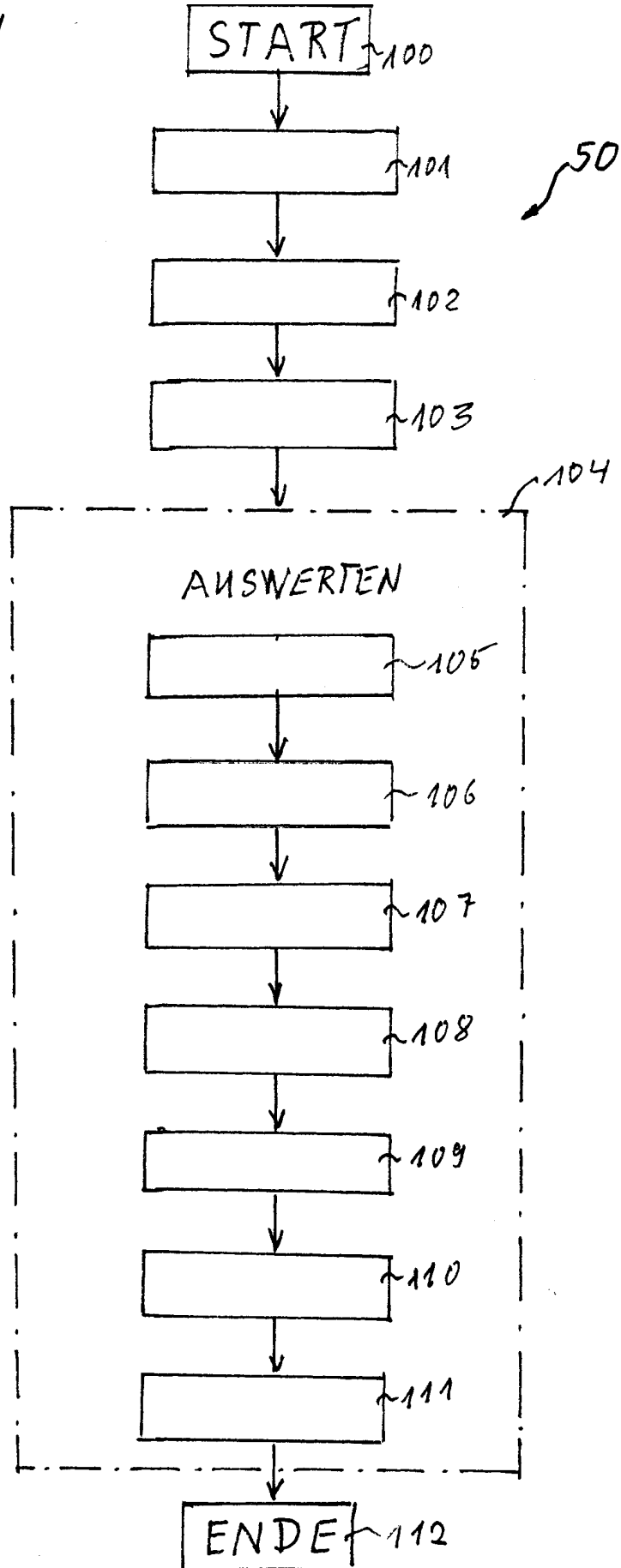


FIG 2

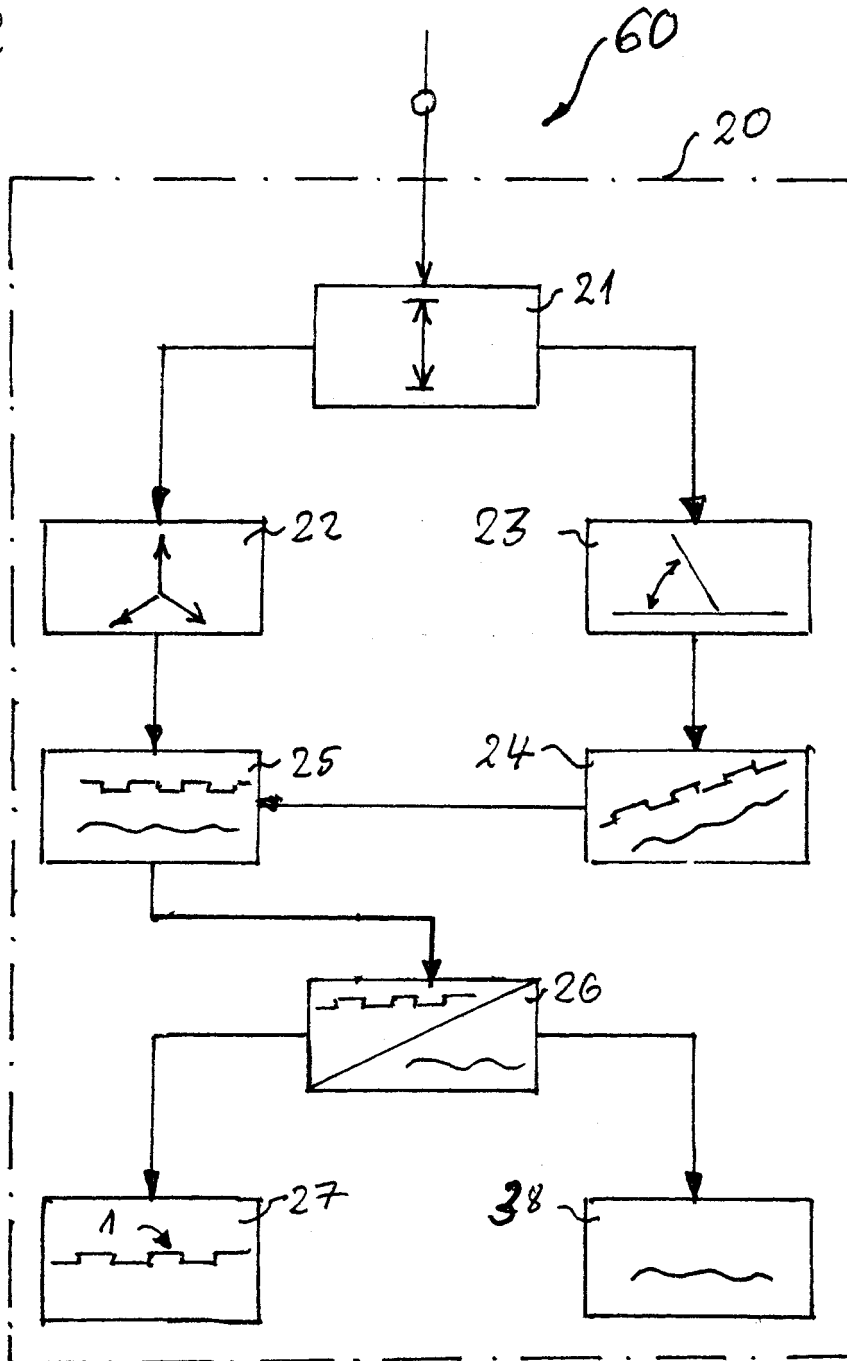


FIG 3

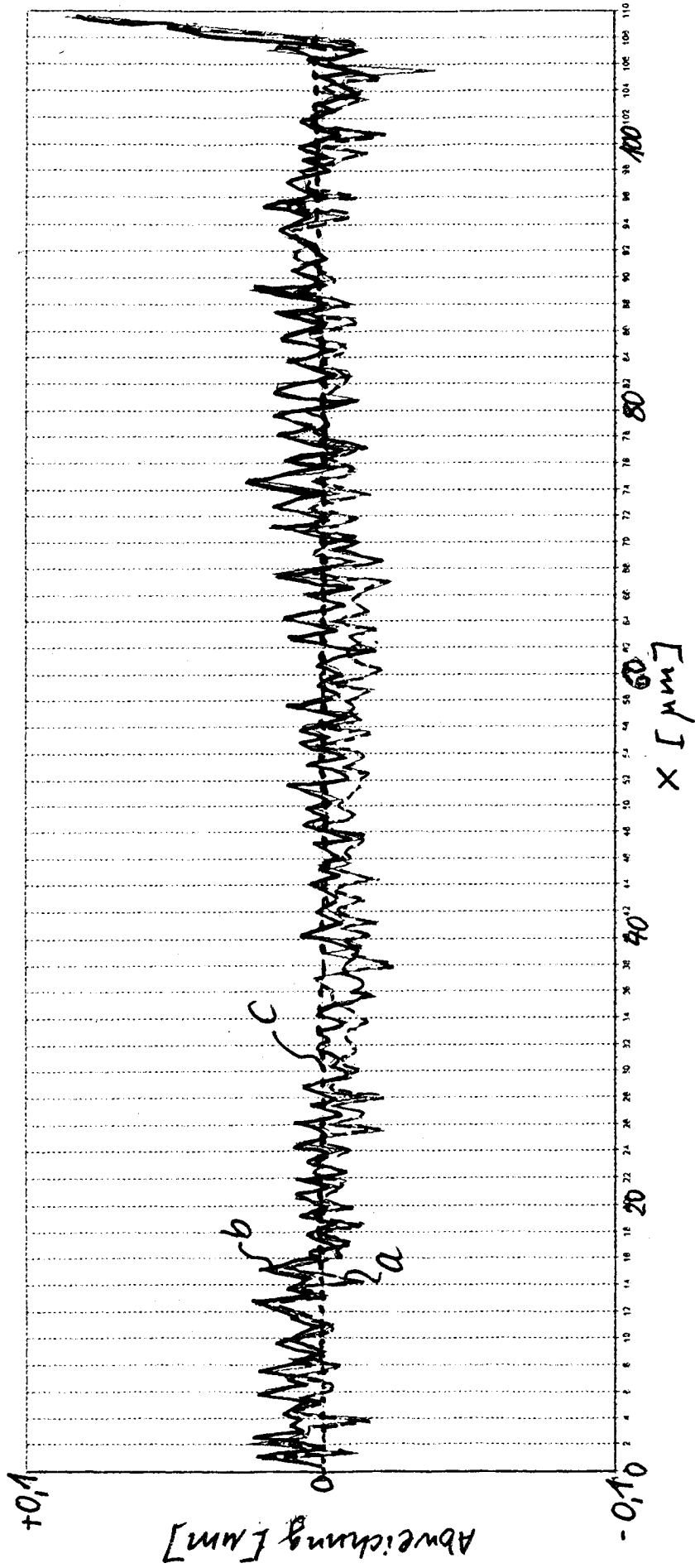


FIG 4

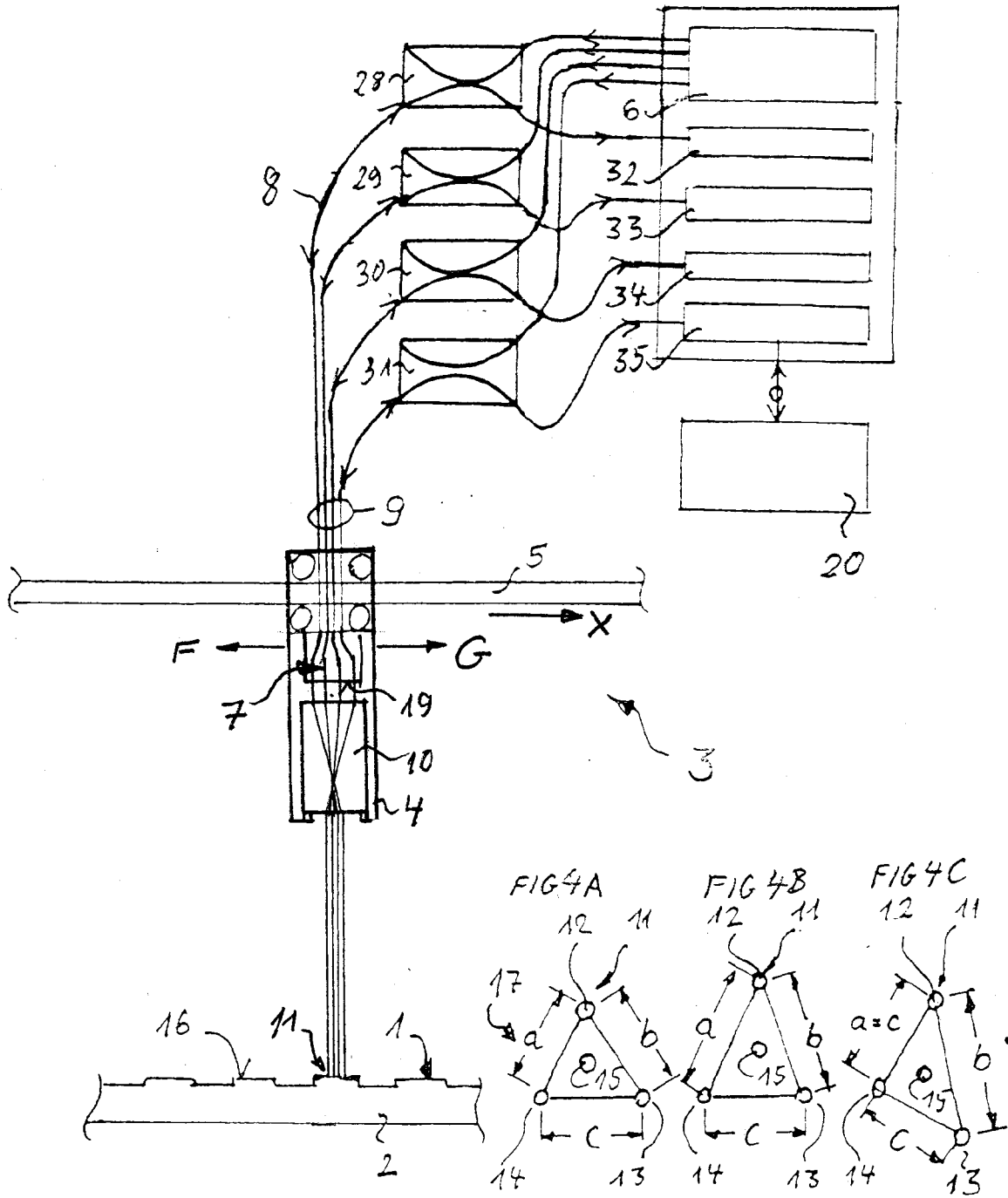


FIG 5

