



(10) **DE 10 2014 203 117 B4** 2015.10.29

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 203 117.6**

(22) Anmeldetag: **20.02.2014**

(43) Offenlegungstag: **20.08.2015**

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **29.10.2015**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Bundesrepublik Deutschland, vertr. durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
dieses vertreten durch den Präsidenten der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:

**Gramm, Lins & Partner Patent- und
Rechtsanwälte PartGmbH, 38122 Braunschweig,
DE**

(72) Erfinder:

**Wiegmann, Axel, 38176 Wendeburg, DE; Quabis,
Susanne, 30657 Hannover, DE; Schulz, Michael,
38550 Isenbüttel, DE; Stavridis, Manuel, 12159
Berlin, DE; Elster, Clemens, 14195 Berlin, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

**DE 10 2004 033 600 B4
JP 2000- 088 551 A**

**G. Schulz, J. Grzanna: Absolute flatness
testing by the rotation method with optimal**

**measuring-error compensation. In: Appl. Opt. 31,
Nr. 19, 3767-3780 (1992)**

**G. Schulz: Ein Interferenzverfahren zur
absoluten Ebenheitsprüfung längs beliebiger
Zentralschnitte. In: Optica Acta 14, 375-388
(1967)**

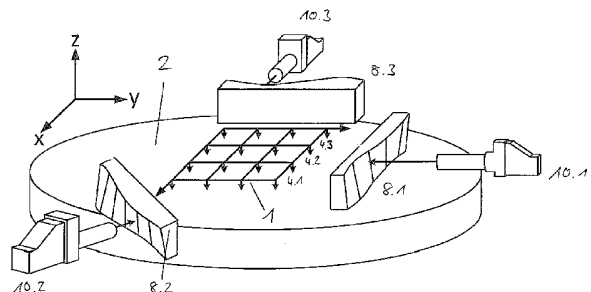
**I. Fujimoto, T. Takatsuji, K. Nishimura, M.Y.
Kim: Autonomous calibration method of the
reference flat surface of an interferometer without
using a standard flat surface. In: Appl. Opt. 51, Nr.
20, 4754-4767 (2012)**

JP 2000-088 551 A (maschinelle Übersetzung)

**R. Mercier, M. Lamare: Experimental
comparison of the two- and the three-flat
methods for absolute optical surface testing. In:
Pure and Applied Optics: Journal of the European
Optical Society Part A 6, Nr. 6, 773-777 (1997)**

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung zum Bestimmen einer Topographie einer Objektoberfläche**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Bestimmen einer Topographie einer Objektoberfläche (2) mit einer Objekthalterung und einem Messkopf (1), der eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Abstandssensoren (4.1, 4.2, ...) zur Messung von Abständen in einer Beobachtungsrichtung (z) zwischen den Abstandssensoren (4.1, 4.2, ...) und der Objektoberfläche (2) aufweist, und relativ zur Objektoberfläche (2) in zumindest einer Richtung (x), die im Wesentlichen senkrecht zu der Beobachtungsrichtung (z) des Messkopfes liegt, verfahrbar ist. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass zumindest drei Reflexionsflächen (8.1, 8.2, 8.3) an dem Messkopf (1) angeordnet sind, und die Vorrichtung zumindest drei Winkelmessgeräte (10.1, 10.2, 10.3) zur Messung von Verkippungen des Messkopfes (1) gegenüber der Objekthalterung umfasst.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Bestimmen einer Topographie einer Objektoberfläche mit einer Objekthalterung und einem Messkopf, der eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Abstandssensoren zur Messung von Abständen in einer Beobachtungsrichtung zwischen den Abstandssensoren und der Objektoberfläche aufweist und relativ zur Objektoberfläche in zumindest einer Richtung, die im Wesentlichen senkrecht zu der Beobachtungsrichtung des Messkopfes liegt, verfahrbar ist.

[0002] Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum Bestimmen einer Topographie einer Oberfläche, bei dem die Objektoberfläche mit einem Messkopf, der eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Abstandssensoren zum Messen von Abständen in einer Beobachtungsrichtung zwischen den Abstandssensoren und der Objektoberfläche aufweist, in zumindest einer Scanrichtung in vorgegebenen Scanschritten abgescannt wird und für eine Mehrzahl von Scanschritten Abstandsinformationen für jeden Abstandssensor ausgelesen werden.

[0003] Um die Topographie optischer Oberflächen zu bestimmen, sind verschiedene Verfahren bekannt. Am häufigsten wird heutzutage als referenzfreies Ebenheitsmessverfahren der sogenannte Drei-Platten-Test verwendet (s. z. B. G. Schulz: *Optica Acta* 14, 375–388 (1967); G. Schulz, J. Grzanna: *Appl. Opt.* 31, Nr 19, 3767–3780 (1992)). Dabei werden in einem der Anordnung des Fizeau-Interferometers entsprechenden Aufbau insgesamt drei Oberflächen von zwei optischen Objekten in Differenzmessungen geprüft, so dass aus den Messdaten anschließend alle drei Topographien eindeutig berechnet werden können. Jedoch muss dazu mindestens eine der drei Flächen einmal als Referenz und einmal als Testfläche genutzt werden. Hierzu muss das entsprechende Objekt rotiert und die Fläche neu positioniert werden, was einen hohen zeitlichen sowie technischen Aufwand erfordert und nur schwer automatisiert werden kann. Alle drei Flächen müssen präzise in vorgegebene Positionen zueinander justiert werden. Weiterhin wird beim Umpositionieren die Auflagefläche verändert, so dass es zu Deformationen am Prüfling kommen kann. Insbesondere für horizontal gelagerte Prüflinge ist der Drei-Platten-Test anfällig gegenüber gravitationsbedingten Durchbiegungen, da einer der drei Prüflinge einmal mit seiner Topographie nach oben zeigend und einmal mit seiner Topographie nach unten zeigend verwendet wird.

[0004] Ebenfalls bekannt ist es, Flüssigkeitsspiegel aus Öl oder Quecksilber als Referenz für eine Ebenheitsmessung zu nutzen (s. z. B. R. Bünnagel: *Z. Angew. Phys.* 8, 342 (1956)). Diese Methode ist jedoch empfindlich gegenüber Vibrationen und Staub, weiterhin kann die Beschaffenheit des Spiegeluntergrunds zu lokalen Oberflächendeformationen des Flüssigkeitsspiegels führen.

[0005] Weiterhin sind verschiedene Verfahren bekannt, bei denen der Prüfling zwischen mehreren Messvorgängen verschoben und/oder verdreht werden muss (R. Mercier, M. Lamare: *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A* 6, Nr. 6, 773 (1997); I. Fujimoto, T. Takatsuji, K. Nishimura, Min Y. Kim: *Appl. Opt.* 51, Nr. 20, 4754–4767 (2012)). Diese Methoden sind ebenfalls recht aufwändig in der Ausführung und ergeben teilweise keine absolute Rekonstruktion der Topographie der Oberfläche, da mindestens die Informationen über den Defokus und teilweise auch über den Astigmatismus verloren gehen.

[0006] Aus der DE 10 2004 033 600 B4 ist es bekannt, eine Messanordnung mit einer Mehrzahl voneinander beabstandeten Abstandssensoren zu verwenden und weiterhin, zum Beispiel mit einem Autokollimator einen Verkippungswinkel des Sensorkopfes zu messen. Dabei können jedoch bloß Schnitte, das heißt eindimensionale Topographien entlang einer Geraden, ermittelt werden. Die vollständige Topographie des Prüflings muss dann wiederum aus einer Vielzahl solcher Schnitte zusammengesetzt werden.

[0007] Aus der JP 2000-088 551 A ist es bekannt, eine Oberfläche mit einem Interferometer zu vermessen, das parallel zu der Oberfläche verfahren werden kann. Gleichzeitig wird mit Hilfe eines Referenzspiegels und eines Autokollimators ein Verkippungswinkel des Interferometers gemessen.

[0008] Wenn ein Messkopf mit einem zweidimensionalen Array von Abstandssensoren mittels eines Führungsmechanismus über den Prüfling geführt wird, so ergeben sich aufgrund von Imperfektionen sowohl der Führung als auch der einzelnen Sensoren eine Reihe von systematischen Fehlern. So kann jedem einzelnen Abstandssensor ein individueller systematischer Fehler zugeordnet werden. Der Führungsmechanismus verursacht Fehler sowohl bedingt durch Höhenabweichungen der Führung als auch durch Winkelabweichungen. Es ist für eine genaue Rekonstruktion der Topographie daher notwendig, jeden Punkt des Prüflings in mehreren Konfigurationen zu scannen, um so die systematischen Fehler bestimmen und eliminieren zu können.

[0009] Es ist somit die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung zum Bestimmen einer Topographie einer Objektoberfläche bereitzustellen, die eine hochpräzise, rückführbare Bestimmungsmöglichkeit der Topographie der Objektoberfläche bietet und dabei ohne Orientierungsänderungen des Prüflings während der Messung auskommt und die unempfindlich gegenüber gravitationsbedingten Störungen ist.

[0010] Zur Lösung der Aufgabe ist erfindungsgemäß eine Vorrichtung zum Bestimmen einer Topographie einer Objektoberfläche der eingangs erwähnten Art dadurch gekennzeichnet, dass sie zumindest drei Reflektionsflächen an dem Messkopf angeordnet sind, und dass sie zumindest drei Winkelmessgeräte zur Messung von Verkippungen des Messkopfes gegenüber der Objekthalterung umfasst.

[0011] Zur Lösung der Aufgabe ist ferner ein Verfahren der eingangs erwähnten Art dadurch gekennzeichnet, dass für eine Mehrzahl von Scanschritten zumindest drei Verkippungswinkel des Messkopfs relativ zu einer Ebene, die im Wesentlichen parallel zu der Objektoberfläche steht, ermittelt werden und aus den Abstandsinformationen und den Verkippungswinkeln von einer Auswerteeinheit die Topographie der Objektoberfläche rekonstruiert wird.

[0012] Die Reflektionsflächen können parallel oder im Wesentlichen parallel zur Beobachtungsrichtung des Messkopfs orientiert an dem Messkopf angebracht sein. Wesentlich ist aber lediglich, dass die Reflektionsflächen den zugehörigen Winkelmessgeräten voneinander verschiedene Beobachtungsrichtungen ermöglichen, die auch von der Beobachtungsrichtung des Messkopfes (z. B. der z-Achse) verschieden sind.

[0013] Unter einer Verkippung wird dabei eine Abweichung von einer vorgegebenen Sollebene verstanden. Wenn sich der Messkopf während des Scanvorgangs verkippt, so ändert er folglich seine Orientierung zum Prüfling, was einen Messfehler verursacht.

[0014] Wenn die Schrittweite des Scanrasters einem Vielfachen des Abstands der einzelnen Abstandssensoren untereinander entspricht, liegt für jeden gescannten Punkt der Oberfläche des Prüflings, also für jeden Punkt der Objektoberfläche, eine entsprechende Anzahl an Messwerten vor. Gleichzeitig wird zumindest für einige Positionen, die der Messkopf, in dem die Abstandssensoren vereint sind, einnimmt, die Verkippung des Messkopfes gegenüber einer Referenzebene, die senkrecht zur Beobachtungsrichtung steht, ermittelt. Wie später noch gezeigt werden wird, lässt sich anhand dieser Informationen die Topographie der Objektoberfläche absolut bestimmen. Es ist dabei nicht notwendig, optische Elemente auszubauen, zu verschieben oder auf andere Art zu bewegen. Während der Messung ist der Messkopf das einzige Bauteil, das bewegt wird. Es ist daher möglich, Prüflinge in nahezu beliebigen Orientierungen zu vermessen. Auch kann das Verfahren weitgehend automatisiert werden, da keine aufwändigen manuellen Umbauten und Justagen während der Messung notwendig sind.

[0015] Bevorzugt ist der Messkopf in zumindest zwei Richtungen verfahrbar. Die beiden Richtungen können senkrecht aufeinander stehen und zum Beispiel der x- und y-Richtung eines karthesischen Koordinatensystems entsprechen. Es gibt dann bis auf die Größe des Probenhalters keine Beschränkung der Fläche des zu scannenden Prüflings. Natürlich kann anstatt des Messkopfes auch der Prüfling bzw. die Objekthalterung verfahren werden. Es kommt nur auf die relative Bewegung zwischen Messkopf/Objekthalterung und Prüfling an.

[0016] Der Messkopf kann dabei ein zweidimensionales Array (Gitter) von Messpunkten (Abstandssensoren), also z. B. 100×100 Punkte oder mehr, aufweisen. Prinzipiell ist aber auch eine einzelne Linie von Abstandssensoren denkbar.

[0017] Typischerweise werden als Winkelmessgeräte Autokollimatoren genutzt. Prinzipiell sind aber auch andere Winkelmessgeräte, wie z. B. Winkelinterferometer ebenso geeignet. Die von den Autokollimatoren gemessenen Winkel lassen sich in einen Anteil parallel zu der Ebene, in der der Messkopf bewegt wird, und in einen Anteil senkrecht dazu aufteilen. Relevant ist hier primär der senkrechte Anteil, da dieser Rückschlüsse auf Winkelungenauigkeiten in der Führung des Messkopfes zulässt. Der parallele Anteil der gemessenen Winkel re-präsentiert prinzipiell eine Drehung des Messkopfes, was aber im Regelfall höchstens zu sehr kleinen Fehlern bei der Abstandsmessung führt.

[0018] Bevorzugt ist der Messkopf Teil eines Fizeau-Interferometers. Prinzipiell kann aber auch jede andere Art von Abstandssensoren genutzt werden. So ist auch ein Array aus chromatischen Sensoren oder taktilen Tastern denkbar und möglich.

[0019] In einer Weiterbildung der Erfindung arbeitet eine elektronische Auswerteeinheit mit der Vorrichtung zusammen, um die Topographie der Objektoberfläche zu rekonstruieren. Eine solche Auswerteeinheit kann ein entsprechend programmierter Computer sein. Durch die Integration einer solchen Auswerteeinheit in das System wird eine weitere Automatisierung des Verfahrens möglich.

[0020] Die Auswerteeinheit erlaubt die Kompensation systematischer Fehler der Referenzspiegel der Winkelmessgeräte sowie systematischer Fehler des Messkopfes bzw. des Sensorarrays. Darüber hinaus kann der Ausfall einzelner Messwerte, also z. B. von Winkelmesswerten oder Abstandsmesswerten mit Hilfe des Sensorarrays kompensiert werden.

[0021] In einer möglichen Konfiguration bilden jeweils zwei der drei Reflektionsflächen einen Winkel von 120° miteinander. Diese Konfiguration zeichnet sich durch eine hohe Symmetrie aus und erlaubt eine hohe Genauigkeit bei der Messung der Verkippungen des Messkopfes.

[0022] Andere Konfigurationen der Reflektionsflächen sind ebenfalls denkbar. So können zum Beispiel eine erste und eine zweite Reflektionsfläche miteinander einen Winkel von 90° und die dritte Reflektionsfläche mit der ersten Reflektionsfläche und mit der zweiten Reflektionsfläche jeweils einen Winkel von 45° bilden. Eine solche Anordnung ist kompakt und sorgt für eine räumliche Konzentration der drei Winkelmessgeräte. Weiterhin ist eine solche Anordnung einfach zu justieren und die Daten lassen sich relativ einfach auswerten, ein entsprechendes Auswertungsprogramm ist also mit relativ geringem Aufwand programmierbar.

[0023] Prinzipiell können die Reflektionsflächen und somit auch die Beobachtungsrichtungen der Winkelmessgeräte aber in einer beliebigen Konfiguration zueinander ausgerichtet sein. Dabei gilt jedoch, dass die Unsicherheit bei der Bestimmung der Topographie umso größer wird, je kleiner der kleinste Winkel zwischen zwei Spiegeln ist. Es ist daher zweckmäßig, zu kleine Winkel zwischen den Spiegeln, z. B. Winkel $< 20^\circ$, zu vermeiden.

[0024] Die Referenzspiegel für die Winkelmessgeräte müssen einen festen Winkel zu dem Messkopf und somit zu dem Sensor-Array aufweisen. Wenn ein Fizeau-Interferometer genutzt wird, so ist es zweckmäßig, einen Polygonspiegel einzusetzen, der sowohl die erfindungsgemäßen Reflektionsflächen als auch eine Referenzfläche des Interferometers bereitstellt. Ein solcher Polygonspiegel ist dann über die seitlichen Spiegelflächen Referenzspiegel der Winkelmessgeräte bzw. Autokollimatoren und über die große Fläche Referenzfläche des Interferometers. Unter einem Polygonspiegel wird dabei ein Körper verstanden, der mehrere möglichst ebene Oberflächen aufweist, die miteinander feste Winkel bilden und zumindest für bestimmte Wellenlängen hohe Reflektionskoeffizienten aufweisen, also spiegeln.

[0025] Wenn der Messkopf in äquidistanten Schritten über den Prüfling bewegt wird, so muss die Größe der Scanschritte dem sogenannten Rekonstruktionsabstand, der in der Regel identisch mit dem Pixelabstand des Sensorarrays ist, entsprechen. Es ist aber auch möglich, den Sensor in nichtäquidistanten Schritten über den Prüfling zu führen. Die Größe der Scanschritte kann dabei beispielsweise zwischen $500\ \mu\text{m}$ und $2000\ \mu\text{m}$ variieren. Die Größe der Scanschritte hängt dann auch vom Durchmesser des Prüflings ab. Durch ein solches Variieren der Scanschritte kann die Anzahl der benötigten Messpositionen deutlich reduziert werden, wobei die Auflösung des Prüflings dennoch unverändert hoch bleibt. Ein typischer Wert für die Auflösung ist dabei $100\ \mu\text{m}$. Im Fall von nichtäquidistanten Scanschritten müssen diese der Prüflingsgröße angepasst werden.

[0026] Die Erfindung soll im Folgenden anhand der beigefügten Figuren näher erläutert werden. Es zeigen

[0027] Fig. 1 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung,

[0028] Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Polygonspiegels entsprechend einer Ausführungsform der Erfindung und

[0029] Fig. 3 eine Übersicht der verwendeten Koordinatensysteme

[0030] Fig. 1 zeigt ein zu vermessendes Objekt mit einer Objektoberfläche **2**, die von einem Messkopf **1**, der Abstandssensoren **4.1**, **4.2**, ... umfasst, gescannt wird. Der Messkopf ist dabei nicht dargestellt, sondern wird von dem Gitter, das von den einzelnen Abstandssensoren gebildet wird, repräsentiert. Die Abstände zwischen den einzelnen Abstandssensoren sowie die Größe der Scanschritte beträgt dabei zum Beispiel $100\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$ oder $1000\ \mu\text{m}$. Die Beobachtungsrichtung der Abstandssensoren wird durch die kleinen, nach unten gerichteten

Pfeile repräsentiert und liegt parallel zur z-Richtung. Weiterhin dargestellt sind die drei Reflektionsflächen **8.1**, **8.2** und **8.3**, die im dargestellten Fall als Referenzspiegel für die Autokollimatoren **10.1**, **10.2** und **10.3** dienen.

[0031] Die Vermessung eines Prüflings verläuft dabei wie folgt:

Ein in einem Messkopf **1** untergebrachtes zweidimensionales Array aus Abstandssensoren **4.1**, **4.2**, ..., beispielsweise ein Fizeau-Interferometer, bei dem jedes Pixel als unabhängiger Abstandssensor aufgefasst wird, oder aber z. B. ein Array aus chromatischen Sensoren oder taktile Tastern, wird über den Prüfling **2** geführt. In jeder Messposition i, j der Führung, charakterisiert durch die Messposition x_i, y_j , misst jeder der Abstandssensoren **4.1**, **4.2**, ... den Abstand zwischen Sensor **4.1**, **4.2**, ... und Prüfling **2**. Bedingt durch Winkelabweichungen ($\beta_{i,j} \gamma_{i,j}$) und Höhenabweichungen ($\alpha_{i,j}$) der Führung sind die Messwerte in jeder Messposition durch die Führungsabweichungen verfälscht. Im Sensorkoordinatensystem hat der Abstandssensor k, l die Position x_k, y_l . Jedem Abstandssensor wird ein individueller systematischer Fehler $\epsilon_{k,l}$ zugeordnet. Dies ist im Falle eines Fizeau-Interferometers die Abweichung der Referenzfläche von einer idealen Ebene an der jeweiligen Pixelposition oder im Falle von chromatischen Sensoren eine abweichende Nullpunktskalibrierung zwischen den einzelnen Sensoren. In der Messposition i, j misst der Abstandssensor k, l :

$$m_{i,j,k,l} = f_{i+k,j+l} + \alpha_{i,j} + \beta_{i,j} x_k + \gamma_{i,j} y_l + \epsilon_{k,l} \quad \text{Formel 1}$$

[0032] Dabei bezeichnet $f_{i+k,j+l}$ die Topographiehöhe an der Stelle $\vec{x}_{i,j,k,l} = (x_i + x_k, y_j + y_l)^T$ (s. **Fig. 3**) Das Bezugszeichen **12** bezeichnet dabei die Grenze des Prüflings **2**, das Bezugszeichen **14** kennzeichnet das Koordinatensystem des Messkopfes und das Bezugszeichen **16** kennzeichnet das Koordinatensystem der Prüflingsoberfläche **2**.

[0033] Fest zu dem Sensor sind Referenzspiegel **8.1**, **8.2**, **8.3** für Winkelmessgeräte **10.1**, **10.2**, **10.3** montiert (beispielsweise Autokollimatoren oder Winkelinterferometer). Die dazugehörigen Winkelmessgeräte **10.1**, **10.2**, **10.3** sind fest zu dem Prüfling bzw. zur Objekthalterung montiert.

[0034] Mit den Winkelmessgeräten **10.1**, **10.2**, **10.3** wird die Änderung der Winkel zwischen dem Messkopf **1** und dem Prüfling **2** während der Messung erfasst. Die von dem Winkelmessgerät **10.1**, **10.2**, **10.3** erfassten Neigungswinkel hängen von der Messrichtung

$$\vec{n}_{AC} = (n_{AC_x}, n_{AC_y})^T$$

der Winkelmessgeräte ab:

$$\theta_{i,j}^{AC} = n_{AC_x} \beta_{i,j} + n_{AC_y} \gamma_{i,j} \quad \text{Formel 2}$$

[0035] Die Topographien der Referenzspiegel **8.1**, **8.2**, **8.3** der Winkelmessgeräte **10.1**, **10.2**, **10.3** führen zu systematischen Fehlern bei der Winkelmessung, da jedes Mal wenn einer der Referenzspiegel **8.1**, **8.2**, **8.3** senkrecht zur Messrichtung \vec{n}_{AC} bewegt wird, die veränderte lokale Neigung des Referenzspiegels **8.1**, **8.2**, **8.3** zu einem Offsetwinkel $\sigma_{i,j}$ führt. Bei der Nutzung von drei Winkelmessgeräten **10.1**, **10.2**, **10.3** mit den Messrichtungen $\vec{n}_{AC1} = (1, 0)^T$, $\vec{n}_{AC2} = (0, -1)^T$ und $\vec{n}_{AC3} = (1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2})^T$ ergibt sich beispielsweise für die Winkelmesswerte:

$$\theta_{i,j}^{AC1} = \beta_{i,j} + \sigma_j^1 \quad \text{Formel 3}$$

$$\theta_{i,j}^{AC2} = -\gamma_{i,j} + \sigma_i^2$$

$$\theta_{i,j}^{AC3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \beta_{i,j} - \frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_{i,j} + \sigma_{i,j}^3$$

[0036] Der Sensor wird relativ zum Prüfling in x- und y-Richtung bewegt. Die Verkipfung des Sensors **1** relativ zum Prüfling **2** wird aus mindestens drei verschiedenen Richtungen gemessen. Die Messrichtungen der Autokollimatoren **10.1**, **10.2**, **10.3** können äquidistant über einen um das Zentrum des Prüflings gedachten Kreis verteilt werden (je 120° zwischen benachbarten Autokollimatoren), aber auch nichtäquidistant wie in dem in

Fig. 1 gezeigten Ausführungsbeispiel. Hier bilden zwei der drei Autokollimatoren (**10.1**, **10.3**) einen Winkel von 90° miteinander, während der dritte Autokollimator (**10.2**) mit den beiden anderen Autokollimatoren jeweils einen Winkel von 135° bildet.

[0037] Die Messung der Verkippungswinkel kann für jeden Scanschritt erfolgen. Dies ist aber nicht zwingend notwendig. So kann eine Steigerung der Effizienz des Verfahrens erreicht werden, wenn nur an einigen Messpositionen die Verkippungswinkel ermittelt werden. Wenn nicht für alle Messpositionen, sondern nur für eine Mehrzahl von Messpositionen die Verkippungswinkel ermittelt werden, so ist es notwendig, dass die Messpositionen, für die die Verkippungswinkel ermittelt werden, auf zumindest 3 nicht kollinearen Geraden liegen. Ein Beispiel für 3 solche Geraden wären alle Messpunkte, deren Koordinaten im x-y-Koordinatensystem der Oberfläche des Prüflings sich wie folgt darstellen lassen: $(n; 0)$, $(0; n)$ und $(n; n)$, wobei n ein fortlaufender Index ist. Es würden dann für jeden Messpunkt, der entweder auf einer der Achsen oder auf der Diagonalen liegt, die Verkippungswinkel ermittelt.

[0038] Wird die Neigung aus nur zwei Richtungen gemessen, werden also nur zwei Winkelmessgeräte eingesetzt, so bleibt mindestens ein Astigmatismus-Term unbestimmt, da nicht unterschieden werden kann, ob sich die Winkeltopographie der Autokollimatorreferenzspiegel linear mit der Spiegelposition ändert, oder ob ein Astigmatismus im Prüfling (bzw. den systematischen Fehlern $\varepsilon_{k,l}$) vorliegt.

Auswertung

[0039] Die unbekannt Topographiewerte ($f_{i+k,j+l}$), systematischen Sensorfehler ($\varepsilon_{k,l}$), Offsetwinkel ($\sigma_{i,j}$), Tilts ($\beta_{i,j}$, $\nu_{i,j}$) und Offsetfehler ($\alpha_{i,j}$) werden aus den Messwerten $\theta_{i,j}^{AC}$ und $m_{i,j,k,l}$ berechnet. Da die Gleichungen (1)–(3) linear in den genannten Unbekannte sind, kann ein lineares Gleichungssystem

$$A\vec{s} = \vec{b}$$

Formel 4

aufgestellt werden, welches die unbekannt Größen (\vec{s}) mit den Messwerten (\vec{b}) verknüpft. Die Matrix A wird dabei entsprechend der Gleichungen (1)–(4) aufgestellt. Der Lösungsvektor s wird durch Minimierung des Ausdrucks

$$\chi^2 = (\vec{A}\vec{s} - \vec{b})^T U_{\vec{b}}^{-1} (\vec{A}\vec{s} - \vec{b})$$

Formel 5

bestimmt. Dabei bezeichnet

$$U_{\vec{b}}$$

die Kovarianzmatrix der Messwerte \vec{b} . Geht man von unkorrelierten Messwerten \vec{b} aus, so ist

$$U_{\vec{b}}$$

eine Diagonalmatrix.

[0040] Das Messverfahren kann die Topographie nur bis auf eine unbekannt Ebene eindeutig rekonstruieren. Zu diesem Zweck müssen drei Bedingungen an die Topographie gestellt werden. Beispielsweise können drei nicht kollineare Punkte $f_{i+k,j+l}$ Null gesetzt werden. Oder es werden drei Bedingungen so gestellt, dass die rekonstruierte Topographie keinen Mittelwert ($\sum f_{i,j} = 0$) und keine resultierende Steigung in x- und y-Richtung hat ($\sum x_i \cdot f_{i,j} = 0$, $\sum y_j \cdot f_{i,j} = 0$).

[0041] Des Weiteren muss einer der systematischen Sensorfehler konstant gesetzt werden (beispielsweise $\varepsilon_{0,0} = 0$), da ansonsten nicht zwischen einem konstantem Offset und einem konstantem systematischen Sensorfehler unterschieden werden kann. Letztlich müssen noch zwei Offsetwinkel fixiert werden (beispielsweise $\sigma_{0,0}^1 = \sigma_{0,0}^2 = 0$). Diese Bedingungen stellen aber hinsichtlich einer Flächenmessung keine Einschränkungen dar, da sie nur die Lage der Fläche im Raum und nicht die Topografie beschreiben. Um die Berechnung zu erleichtern, können sowohl die Topographie als auch die systematischen Sensorfehler parametrisiert werden, beispielsweise durch Zernikepolynome (aber auch jeden beliebigen anderen Satz Basisfunktionen):

$$f_{i+k,j+l} = f(x_i + x_k, y_j + y_l) = \sum_{n,m} \alpha_n^m Z_n^m(r_{i,j,k,l}, \varphi_{i,j,k,l}) \quad \text{Formel 6}$$

$$\varepsilon_{k,l} = \varepsilon(x_k, y_l) = \sum_{n,m} \zeta_n^m Z_n^m(r_{k,l}, \varphi_{k,l}) \quad \text{Formel 7}$$

[0042] Dabei ist $Z_n^m(r, \varphi)$ das Zernikepolynom mit radialem Grad n und azimuthaler Ordnung m . Die Randbedingungen an die Topographie werden in diesem Falle dadurch erfüllt, dass nur Zernike-Terme mit $n > 1$ rekonstruiert werden. Die Randbedingungen an die systematischen Sensorfehler werden in diesem Falle dadurch berücksichtigt, dass nur Terme mit $n > 0$ rekonstruiert werden. Die kartesischen Koordinaten $(x_i + x_k, y_j + y_l)$ (bzw. (x_k, y_l)) sind hier in Polarkoordinaten $(r_{i,j,k,l}, \varphi_{i,j,k,l})$ bzw. $r_{k,l}, \varphi_{k,l}$ umgerechnet worden. Setzt man die Formel 7 und die Formel 8 in Formel 1 (bzw. Formel 2) ein, so sind die resultierenden Gleichungen linear in den Zernikekoeffizienten α_n^m (Topographie) und ζ_n^m (systematische Sensorfehler). Die Größen \vec{s} können also wie zuvor erläutert durch Lösen eines linearen Gleichungssystems bestimmt werden. Ebenso können die Offsetwinkel $\sigma_{i,j}$ der Referenzspiegel **8.1, 8.2, 8.3** der Autokollimatoren **10.1, 10.2, 10.3** parametrisiert werden:

$$\sigma_{i,j} = \sum_n L_n P_n(t_{i,j}) \quad \text{Formel 8}$$

[0043] Als Basisfunktionen P können z. B. Legendre-Polynome verwendet werden. Die Position $t_{i,j}$ kann aus der aktuellen Position (x_i, y_j) der Bewegungsachsen und der Messrichtung des Autokollimators \vec{n}_{AC} berechnet werden. Die Parametrisierung der Offsetwinkel ist insbesondere für Messanordnungen notwendig, bei denen für die Komponenten

$$n_{AC_x}, n_{AC_y}$$

der Autokollimatormessrichtung

$$\frac{n_{AC_x}}{n_{AC_y}} \neq \frac{N}{M}$$

gilt, mit $N, M \in \mathbb{Z}$. Denn für diese Messrichtungen wird in jeder Messposition ein anderer Ausschnitt des Referenzspiegels von dem zugehörigen Autokollimator verwendet. Würde man also für jede Messposition einen Offsetwinkel in Betracht ziehen, so würde mit jeder Winkelmessung dem Gleichungssystem eine unbekannte Variable hinzugefügt werden müssen und das Gleichungssystem hätte keine eindeutige Lösung mehr. Iterative Lösungsverfahren, welche Gleichung (5) numerisch mit Hilfe mehrerer Iterationsschritte minimieren, können ebenfalls genutzt werden.

[0044] Die Referenzspiegel für die Autokollimatoren müssen einen festen Winkel zu dem Sensorarray haben. Wird ein Fizeau-Interferometer genutzt, so wird zweckmäßigerweise ein Polygonspiegel entsprechend **Fig. 2** genutzt.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Bestimmen einer Topographie einer Objektoberfläche (2) mit
 - i. einer Objekthalterung und
 - ii. einem Messkopf (1), der
 - a) eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Abstandssensoren (4.1, 4.2, ...) zur Messung von Abständen in einer Beobachtungsrichtung (z) zwischen den Abstandssensoren (4.1, 4.2, ...) und der Objektoberfläche (2) aufweist, und
 - b) relativ zur Objektoberfläche (2) in zumindest einer Richtung (x), die im Wesentlichen senkrecht zu der Beobachtungsrichtung (z) des Messkopfes liegt, verfahrbar ist, **dadurch gekennzeichnet, dass**
 - iii. zumindest drei Reflexionsflächen (8.1, 8.2, 8.3) an dem Messkopf (1) angeordnet sind, und

iv. die Vorrichtung zumindest drei Winkelmessgeräte (**10.1**, **10.2**, **10.3**) zur Messung von Verkippungen des Messkopfes (**1**) gegenüber der Objekthalterung umfasst.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Messkopf in zumindest zwei Richtungen (x, y), die im Wesentlichen senkrecht zu der Beobachtungsrichtung (z) des Messkopfs liegen, verfahrbar ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zumindest drei Winkelmessgeräte (**10.1**, **10.2**, **10.3**) Autokollimatoren oder Winkelinterferometer sind.

4. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Auswerteeinheit mit dem Messkopf zusammenarbeitet, um die Topographie der Objektoberfläche (**2**) zu rekonstruieren.

5. Vorrichtung nach der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass jeweils zwei der drei Reflektionsflächen (**8.1**, **8.2**, **8.3**) miteinander einen Winkel von 120° bilden.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine erste Reflektionsfläche (**8.1**) mit einer zweiten Reflektionsfläche (**8.2**) und einer dritten Reflektionsfläche (**8.3**) jeweils einen Winkel von 45° bildet.

7. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Objekthalterung einen Polygonspiegel (**12**) umfasst.

8. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Messkopf (**1**) ein Fizeau-Interferometer ist, dessen Referenzfläche Teil eines Polygonspiegels (**12**) ist.

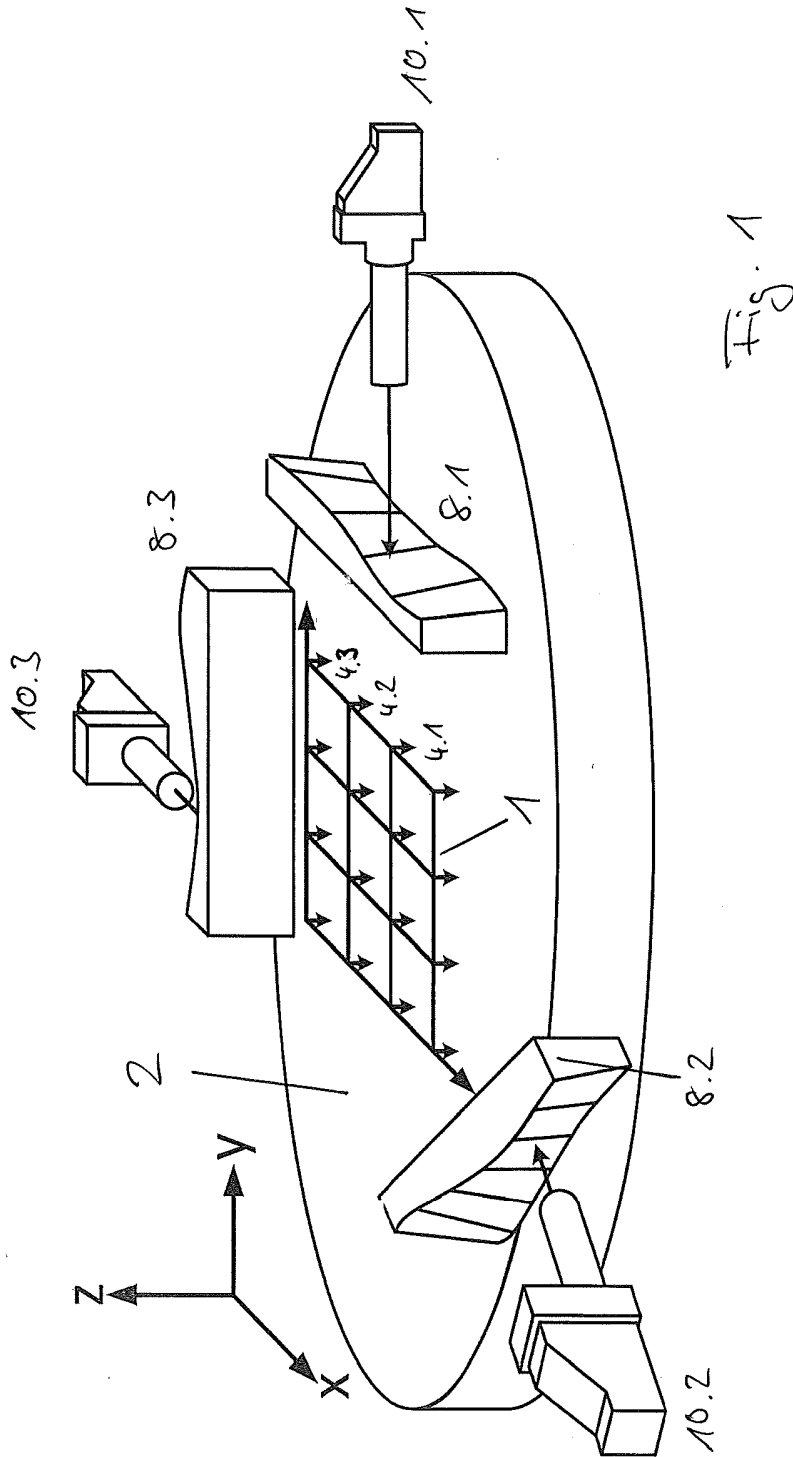
9. Verfahren zum Bestimmen einer Topographie einer Objektoberfläche (**2**), bei dem

- die Objektoberfläche (**2**) mit einem Messkopf (**1**), der eine Mehrzahl von voneinander beabstandeten Abstandssensoren (**4.1**, **4.2**, ...) zum Messen von Abständen in einer Beobachtungsrichtung (z) zwischen den Abstandssensoren (**4.1**, **4.2**, ...) und der Objektoberfläche (**2**) aufweist, in zumindest einer Scanrichtung (x) in vorgegebenen Scanschritten Δx abgescannt wird,
- für jeden Scanschritt Abstandsinformationen für jeden Abstandssensor (**4.1**, **4.2**, ...) ausgelesen werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- für eine Mehrzahl von Scanschritten an zumindest drei an dem Messkopf angeordneten Reflexionsflächen (**8.1**, **8.2**, **8.3**) zumindest drei Verkippungswinkel des Messkopfes relativ zu einer Ebene, die im Wesentlichen parallel zu der Objektoberfläche steht, ermittelt werden, und
- aus den Abstandsinformationen und den Verkippungswinkeln von einer Auswerteeinheit die Topographie der Objektoberfläche rekonstruiert wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Objektoberfläche (**2**) in zumindest zwei Scanrichtungen (x, y) in vorgegebenen Scanschritten Δx , Δy abgescannt wird.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



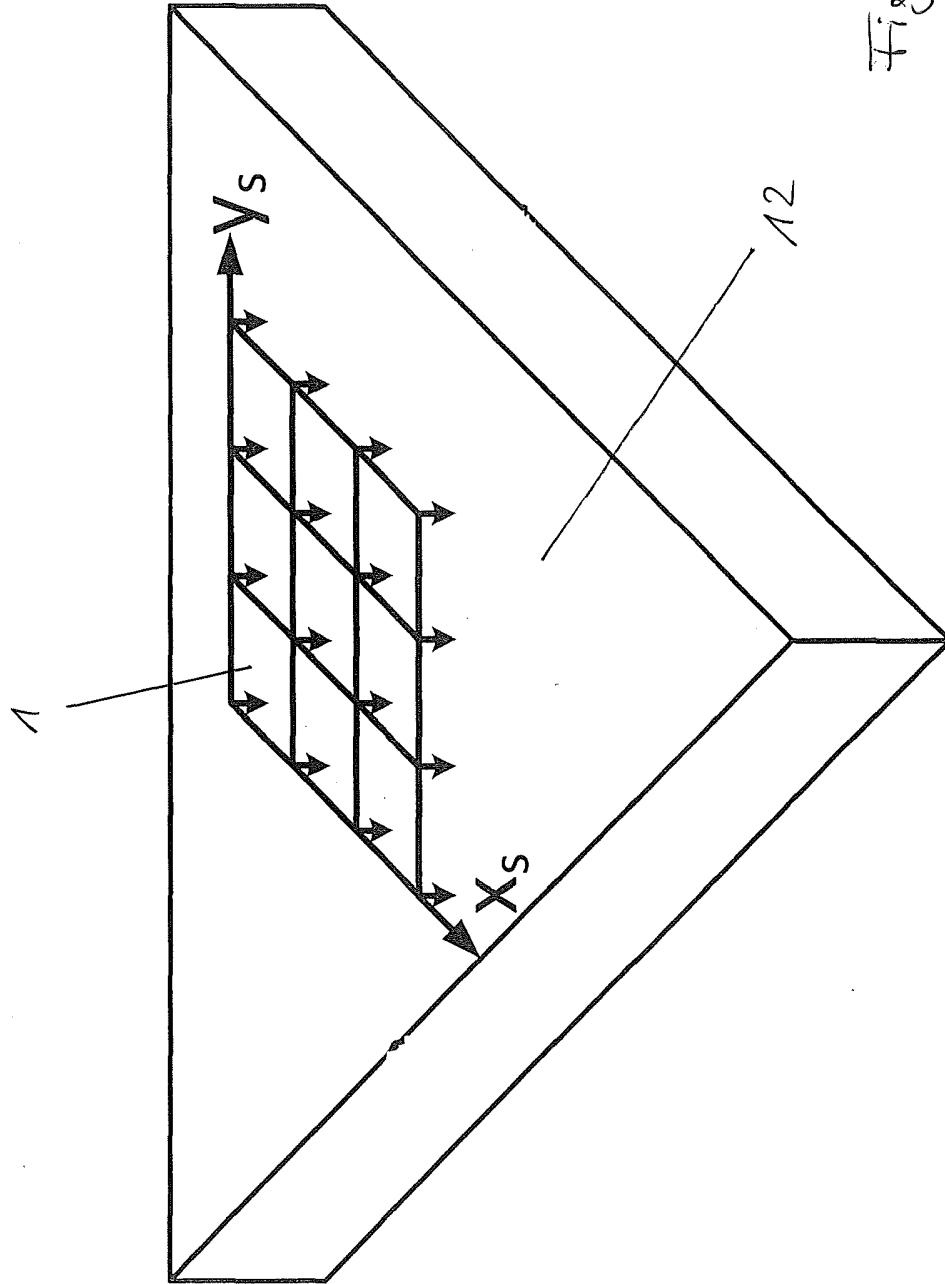


Fig. 2

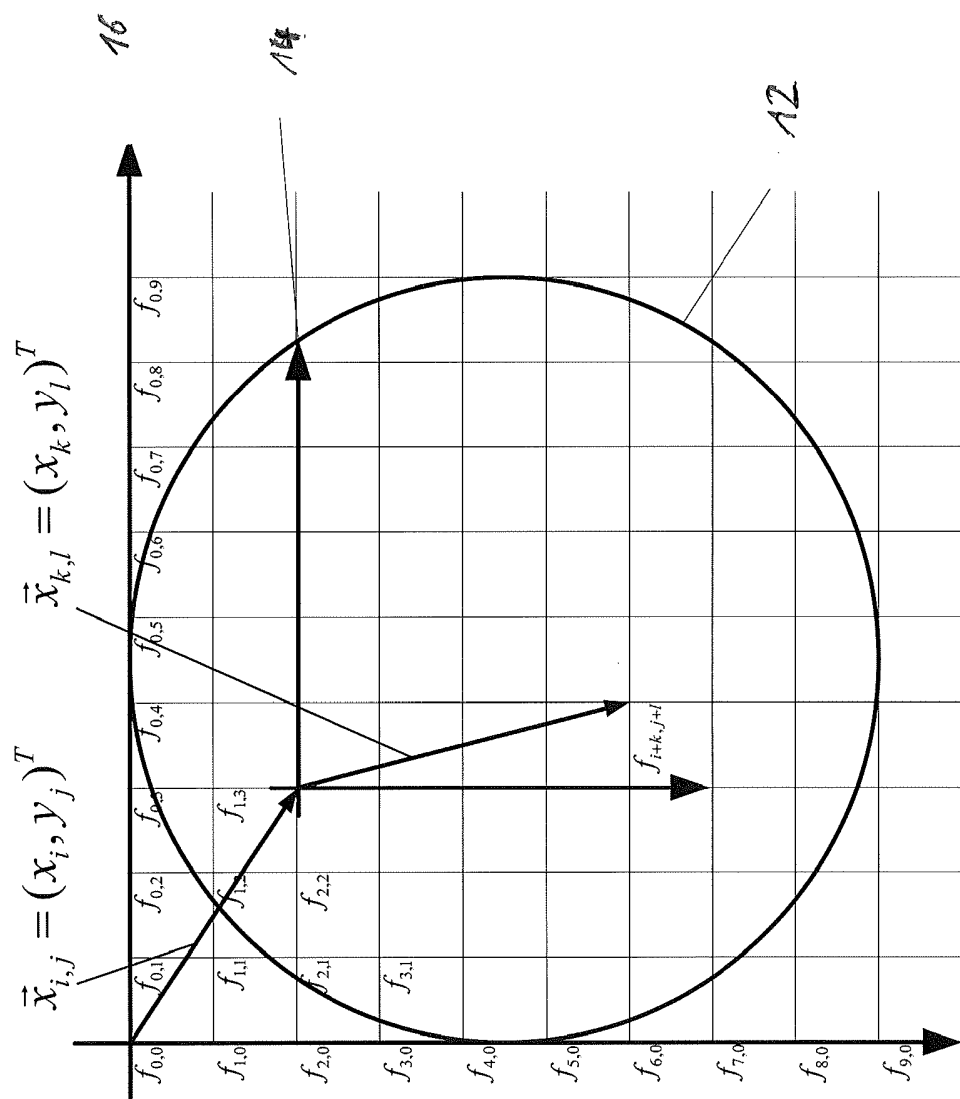


Fig-3