



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2021 211 172.6**
 (22) Anmeldetag: **04.10.2021**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **23.03.2023**

(51) Int Cl.: **G01B 9/02 (2022.01)**
G01B 11/24 (2006.01)
G03F 7/20 (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:
Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE

(74) Vertreter:
Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster & Partner mbB, 70174 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Kruse, Regina, 73432 Aalen, DE

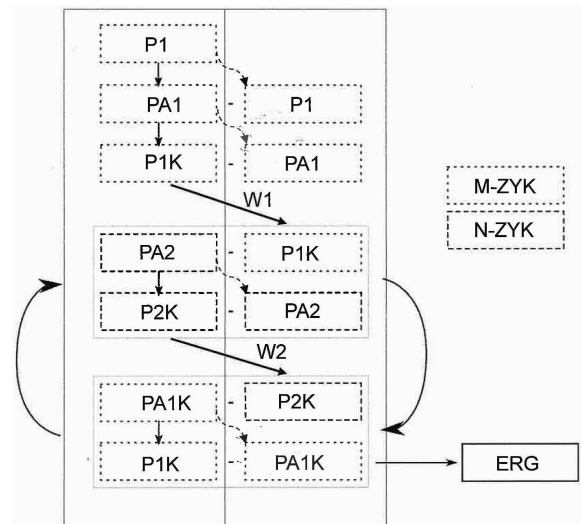
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	100 58 650	A1
DE	10 2017 217 371	A1
US	7 158 914	B2
US	5 982 490	A

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements**

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform einer optischen Oberfläche eines optischen Elements wird dieses als Prüfling vollständig innerhalb des Messbereichs einer interferometrischen Prüfvorrichtung angeordnet. Zwischen einzelnen Messungen wird der Prüfling um eine Prüflingsdrehachse gedreht. Es werden wenigstens zwei Messreihen mit M bzw. N äquidistanten Drehstellungen aufgenommen, wobei M und N teilerfremde natürliche Zahlen sind. Erste und zweite Messwerte der unterschiedlichen Messreihen werden gemeinsam ausgewertet, wobei folgende Schritte iterativ durchgeführt werden; (A) Berechnen einer ersten Passe (P1) auf Basis der ersten Messungen, wobei die erste Passe (P1) eine gemeinsame mitdrehende Passe der ersten Messreihe ist; (B) Subtrahieren der ersten Passe (P1) von den ersten Messwerten zur Bestimmung eines ersten Prüfaufbaufehlers (PA1), der gemeinsame nicht-mitdrehende Fehler der ersten Messreihe enthält; (C) Verwenden des ersten Prüfaufbaufehlers (PA1) zur Berechnung einer korrigierten ersten Passe (P1K), die aus der ersten Passe (P1) durch Subtraktion des ersten Prüfaufbaufehlers (PA1) resultiert; (D) Subtrahieren der korrigierten ersten Passe (P1K) von den zweiten Messwerten zur Bestimmung eines zweiten Prüfaufbaufehlers (PA2); (E) Verwenden des zweiten Prüfaufbaufehlers (PA2) zur Berechnung einer korrigierten zweiten Passe (P2K), die aus den zweiten Messwerten durch Berücksichtigung des zweiten Prüfaufbaufehlers (PA2) resultiert; (F) Verwenden der korrigierten zweiten Passe (P2K) zur Korrektur des ersten Prüfaufbaufehlers (PA1) durch Subtrahieren der korrigierten zweiten Passe (P2K) von den ers-

ten Messwerten zur Bestimmung eines korrigierten ersten Prüfaufbaufehlers (PA1K), der gemeinsame nicht-mitdrehende Fehler der ersten Messreihe und der zweiten Messreihe enthält; (G) Verwenden des korrigierten ersten Prüfaufbaufehlers (PA1K) zur Berechnung einer nochmals korrigierten ersten Passe (P1K); und (H) Vergleichen des Ergebnisses (ERG) mit einem Konvergenzkriterium und optionale Wiederholung der Schritte (A) bis (H) in Abhängigkeit von einem Vergleichsergebnis.



Beschreibung

ANWENDUNGSGEBIET UND STAND DER TECHNIK

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, insbesondere eines Spiegels oder einer Linse einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

[0002] Zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen, wie z.B. Masken für die Mikrolithographie, werden heutzutage meist photolithographische Verfahren und Projektionsbelichtungssysteme verwendet. Dabei wird das zu erzeugende Strukturmuster einer Maske (engl: reticle oder mask) mit von einem Beleuchtungssystem geformtem Beleuchtungslicht beleuchtet und mithilfe eines Projektionsobjektivs auf eine mit einer lichtempfindlichen Schicht beschichtete Funktionsschicht eines Substrats in verkleinerndem Maßstab projiziert. Die dem Strukturmuster entsprechende Struktur wird nach Entwicklung der photoempfindlichen Schicht mittels eines Ätzverfahrens in die Funktionsschicht übertragen.

[0003] Um immer feinere Strukturen erzeugen zu können, wurden in den letzten Jahrzehnten neben mit Licht aus dem tiefen Ultraviolettbereich (DUV) arbeitenden refraktiven und katadioptrischen optischen Systeme mit großer bildseitiger numerischer Apertur NA nahe 1 oder darüber mit und ohne Immersion auch optische Systeme entwickelt, die bei moderateren numerischen Aperturen arbeiten und hohe Auflösungsvermögen im Wesentlichen durch die kurze Wellenlänge der verwendeten elektromagnetischen Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) erzielen, insbesondere mit Arbeitswellenlängen im Bereich zwischen 5 nm und 30 nm, beispielsweise bei Arbeitswellenlängen um 13.5 nm. Da Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV-Strahlung) von den bei höheren Wellenlängen transparenten optischen Materialien absorbiert wird, werden für die EUV-Lithographie Spiegelsysteme eingesetzt.

[0004] Mit der Erhöhung der bildseitigen numerischen Apertur geht tendenziell eine Vergrößerung der erforderlichen Spiegelflächen der in der Projektionsbelichtungsanlage eingesetzten Spiegel einher. Dies hat wiederum zur Folge, dass neben der Fertigung auch die Prüfung der Oberflächenform der Spiegel technisch immer anspruchsvoller wird.

[0005] Die Prüfung der Oberflächenform von optischen Oberflächen wird bei den in dieser Anmeldung betrachteten Verfahren mithilfe interferometrischer Messungen durchgeführt. Bei einer interferometrischen Oberflächenmessung wird im Allgemeinen eine von der zu untersuchenden Oberfläche reflektierte Messwelle mit einer Referenzwelle überlagert und das dabei erzeugte Interferenzmuster erfasst. Dadurch wird die durch Messung zugängliche Istform der Oberfläche interferometrisch mit einer gewünschten Sollformform im Sinne einer Prüfung verglichen. Abweichungen werden auf Basis von Interferogrammen quantifiziert, um die Einhaltung oder Überschreitung von Fertigungstoleranzen festzustellen.

[0006] Die Formabweichung einer optischen Fläche eines Prüflings von ihrer Sollform wird historisch bedingt auch als Passformfehler oder „Passe“ bezeichnet wird, daher spricht man häufig bei solchen Verfahren auch von Passmessung oder Passeprüfung. Ein Ziel einer Passmessung ist eine möglichst genaue Charakterisierung der Passe, also eines Prüflingsfehlers.

[0007] Ein bei solchen Messverfahren auftretendes Problem besteht darin, dass der Aufbau eines Interferometers in der Praxis nicht ideal ist, sondern Abweichungen von einem idealen Aufbau aufweist, z.B. weil die darin befindlichen optischen Komponenten Abweichungen von der perfekten Oberflächenform aufweisen und/oder nicht perfekt justiert sind. Das kann z.B. dazu führen, dass die Referenzwelle Fehler aufweist, weil ihre Wellenfront nicht genau genug der vorzugebenden Soll-Wellenfront entspricht. Derartige Fehler fließen als Prüfaufbaufehler in die Messergebnisse ein und können dazu führen, dass die Oberflächenform der gemessenen optischen Oberfläche unzutreffend charakterisiert wird.

[0008] Eine zentrale Aufgabe auf dem Weg zu hinreichend fehlerarmen Prüfergebnissen besteht daher darin, Prüflingsfehler und Prüfaufbaufehler zuverlässig voneinander zu trennen.

[0009] In manchen Fällen wird bei einer Passmessung zur Trennung der Prüflings- und der Prüfaufbaufehler ein Drehmittlungsverfahren angewendet. Dabei wird das zu untersuchende optische Element (im Folgenden auch „Prüfling“ genannt) zwischen einzelnen Messungen in äquidistanten Schritten um eine Drehachse gedreht und es werden Interferogramme bei einer Anzahl unterschiedlicher Drehstellungen erfasst und ausgewertet. Das Drehmittlungsverfahren ist in der Lage, „mitdrehende“ Signaturen dem Prüfling zuzuordnen,

während „nicht-mitdrehende“ Fehler dem Prüfaufbau zugeschrieben werden. Das führt zu einer sehr guten Abschätzung der Absolutfehler. Allerdings können rotationssymmetrische Anteile und Anteile, welche die Symmetrie der Anzahl der Drehstellungen aufweisen, die sogenannten Welligkeiten, nicht erfasst werden. Beispielsweise kann man bei einem Messverfahren, das zwölf Drehstellungen für eine drehgemittelte Passmessung nutzt, nicht zwischen einer 12-zähligen Symmetrie des Prüflingsfehlers und einer 12-zähligen Symmetrie des Prüfaufbaufehlers unterscheiden.

[0010] Erfahrungsgemäß sind Fehler einer höheren Ordnung tendenziell kleiner sind als Fehler niedrigerer Ordnung. Sie tragen daher weniger zum Fehler auf dem Endprodukt bei. Daher wird es als erstrebenswert angesehen, den Welligkeitsfehler auf möglichst hohe Ordnungen (z.B. 100er Welligkeit) zu treiben. Jedoch sind dafür in erster Instanz hundert oder mehr Drehstellungen zu messen, was sehr viel Mess- und Maschinenzeit erfordert und damit zu höheren Kosten am Endprodukt beiträgt.

[0011] Die DE 100 58 650 A1 beschreibt ein Verfahren zur interferometrischen Messung von nichtrotationssymmetrischen Wellenfrontfehlern an einem Prüfling, der durch Rotation um eine Prüflingsdrehachse sukzessive in mehrere Drehstellungen gebracht werden kann. In jeder der Drehstellungen wird wenigstens ein Messergebnis ermittelt. Die Messung wird in wenigstens zwei Messreihen (M, N) durchgeführt, wobei die Messergebnisse (M1... Mm, N1... Nn) jeder der Messreihen (M, N) in jeweils zueinander äquidistanten Drehstellungen des Prüflings ermittelt werden. Jede der Messreihen (M, N) umfasst eine bestimmte Anzahl n, m an Messungen, wobei m und n natürliche und untereinander teilerfremde Zahlen sind. Abschließend erfolgt eine mathematische Auswertung aller Messergebnisse. Dieses Messverfahren kann sehr effizient aus „N+M“ Drehstellungen einen „N*M“-symmetrischen Welligkeitsfehler erzeugen. Das Verfahren beruht darauf, dass durch eine Differenzbildung einer N-Passe und einer M-Passe zwischen den M-welligen und den N-welligen Prüflingsfehlern und Prüfaufbaufehlern unterschieden werden kann. Dazu wird die N-Drehstellungsmessung oder die M-Drehstellungsmessung mit der gebildeten NM-Passe korrigiert. Das Verfahren bietet bei einer vergleichbaren Anzahl von Messpunkten eine höhere Absolutgenauigkeit als der oben erläuterte Drehstellungstest. Anders formuliert kann das Verfahren mit einer deutlich geringeren Anzahl an Messpunkten eine vergleichbare Genauigkeit wie der Drehstellungstest liefern.

[0012] Die DE 10 2017 217 371 A1 beschreibt ein anderes Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements. Auch in diesem Verfahren werden an dem Prüfling, also dem optischen Element, zahlreiche interferometrischen Messungen durchgeführt, bei welchen jeweils ein Interferogramm zwischen einer von jeweils einem Abschnitt des optischen Elements ausgehenden Prüfwelle und einer Referenzwelle aufgenommen wird. Zwischen diesen Messungen wird die Position des optischen Elements relativ zur Prüfwelle durch Drehung um eine Prüflingsdrehachse schrittweise verändert. Auf Basis dieser Messungen wird die Passe des optischen Elements berechnet. Die Berechnung erfolgt iterativ derart, dass in einer Mehrzahl von Iterationsschritten die Passe des optischen Elements jeweils unter Durchführung einer Vorwärtsrechnung ermittelt wird, wobei jedem dieser Iterationsschritte jeweils eine auf Basis des vorangegangenen Iterationsschrittes angepasste Referenzwelle zugrunde gelegt wird. Das Verfahren ist auch für die Prüfung großer Spiegel o.dgl. geeignet, da das Verfahren auch dann funktioniert, wenn in einer Messung nicht die gesamte Oberfläche des Prüflings erfasst wird, sondern lediglich eine Aufnahme von Subaperturen möglich ist, die nicht die komplette Fläche des Prüflings abdecken.

[0013] Mit der Weiterentwicklung optischer Systeme für die Lithographie gibt es zunehmend optische Elemente mit komplexer Gestalt, deren Prüfung mit konventionellen Techniken nicht oder nicht mehr wirtschaftlich möglich ist. Dazu gehören z.B. Spiegel, die eine Aussparung oder Durchbrechung aufweisen, welche eine nicht-rotationssymmetrische Gestalt hat und/oder nicht symmetrisch zu einem Symmetriezentrum des optischen Elements liegt.

AUFGABE UND LÖSUNG

[0014] Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein gattungsgemäßes Verfahren (mit Prüflingsrotation) zur Charakterisierung der Oberflächenform einer optischen Oberfläche eines optischen Elements bereitzustellen, das es ermöglicht, innerhalb relativ kurzer Gesamtmesszeiten eine zuverlässige Prüfung auch dann durchzuführen, wenn die zu prüfende Oberfläche in Bezug auf eine bei der Prüfung als Prüflingsrotationsachse genutzte Achse nicht vollflächig rotationssymmetrisch ist.

[0015] Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 sowie eine Vorrichtung mit den Merkmalen von Anspruch 5 bereit. Bevorzugte Weiterbildungen sind in den

abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

[0016] Das Verfahren dient zur Charakterisierung der Oberflächenform einer optischen Oberfläche eines optischen Elements. Damit ist somit eine Passeprüfung möglich. Bei dem optischen Element kann es sich z.B. um einen Spiegel oder eine Linse handeln, die im gebrauchsfertig montierten Zustand Teil eines optischen Systems einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage ist, beispielsweise eines Projektionsobjektivs. Das optische Element wird als Prüfling in eine interferometrische Prüfvorrichtung so eingebaut, dass die zu prüfende Oberfläche vollständig innerhalb eines Messbereichs der Prüfvorrichtung angeordnet ist. Der Begriff „Prüfling“ steht hier für das optische Element, dessen optische Oberfläche hinsichtlich ihrer Form bzw. hinsichtlich Formabweichungen geprüft werden soll, also für das „device under test“.

[0017] An dem Prüfling werden mehrere interferometrische Messungen durchgeführt, um zu prüfen, ob die Form der Oberfläche ausreichend genau einer Spezifikation entspricht. In einer interferometrischen Messung werden eine von der Oberfläche ausgehende Prüfwellenfront und eine Referenzwellenfront überlagert bzw. zur Interferenz gebracht, so dass ein Interferogramm entsteht, das Information über die Oberflächenform enthält. Aus der Intensitätsverteilung eines Interferogramms können Messwerte ermittelt werden, z.B. in Form einer Wellenfront bzw. eine Phaseninformation, die dann der weiteren Auswertung zugrunde gelegt wird.

[0018] Das Verfahren sieht eine Prüflingsrotation vor. Dies bedeutet, dass zwischen den einzelnen Messungen die Drehstellung des Prüflings relativ zur Prüfvorrichtung durch begrenzte Drehung des Prüflings um eine Prüflingsdrehachse verändert wird. Dadurch wird der Prüfling in mehreren unterschiedlichen Drehstellungen gemessen. In einer Auswerteoperation werden die aus den Interferogrammen abgeleiteten Messwerte gemeinsam ausgewertet, um eine Forminformation zur Charakterisierung der Oberflächenform der optischen Oberfläche zu ermitteln.

[0019] Das Verfahren sieht analog zu dem aus der DE 100 58 650 A1 bekannten Verfahren vor, dass wenigstens zwei Messreihen mit unterschiedlichen Anzahlen von Drehstellungen durchgeführt werden. Die erste Messreihe umfasst eine Anzahl von M ersten Messwerten, die durch erste Messungen ermittelt werden. Die Messwerte gehören zu M unterschiedlichen äquidistanten Drehstellungen, zwischen denen jeweils ein Drehwinkelunterschied von $360^\circ/M$ besteht. In analoger Weise werden zweite Messwerte erfasst, die eine zweite Messreihe bilden, die Messwerte für N Drehstellungen enthält. Zwischen den Drehstellungen, in denen die zweiten Messwerte erfasst werden, gibt es jeweils einen Drehwinkelunterschied von $360^\circ/N$. Die Zahlen M und N sind teilerfremde natürliche Zahlen.

[0020] Dieses herkömmliche Verfahren liefert gute Ergebnisse, wenn die Sollform der Oberfläche rotations-symmetrisch zu einer Symmetrieachse ist, diese als Prüflingsdrehachse genutzt wird und die zu prüfende Oberfläche eine zur Prüflingsdrehachse zentrierte, nahezu kreisförmige Außenkontur aufweist und insoweit vollflächig ist, als sie keine Lücke, Aussparung oder Durchbrechung aufweist, die nicht rotationssymmetrisch zur Prüflingsdrehachse ist. Derartige zu prüfende Oberflächen werden hier als vollflächig-rotationssymmetrisch bezeichnet. Bei Vorliegen dieser Bedingungen spricht man auch von einer Prüfung von „On-Axis-Aperturen“.

[0021] Die vorliegende Erfindung erlaubt darüber hinaus auch zuverlässige Prüfungen von „Off-Axis-Aperturen“, also an Prüflingen, bei denen die zu prüfende Oberflächen nicht vollflächig-rotationssymmetrisch sind. Nachfolgend werden die dazu vorgeschlagenen Schritte erläutert.

[0022] Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Verfahren gemäß der beanspruchten Erfindung und dem o.g. Stand der Technik liegt in der Auswertung der Messergebnisse. Bei der Auswerteoperation wird ein iteratives Auswerteverfahren genutzt, also ein Prozess des mehrfachen Wiederholens gleicher oder ähnlicher Auswertungsschritte zur schrittweisen Annäherung an das angestrebte Endergebnis.

[0023] In einem ersten Schritt (A) wird auf Basis der ersten Messungen eine erste Passe berechnet. Die erste Passe ist eine gemeinsame mitdrehende Passe der ersten Messreihe. Die erste Passe enthält Forminformation, welche in den ersten Messwerten für alle M Drehstellungen im Wesentlichen gleich vorhanden ist. Dem liegt die Überlegung zugrunde, dass sich ein Fehler, der tatsächlich auf Formabweichungen am Prüfling zurückgeht, in allen Drehstellungen in gleicher Weise zeigt, jedoch jeweils an anderer Drehposition in Bezug auf die Prüflingsrotationsachse. Die Signatur dieses Fehlers in den Interferogrammen dreht sich somit mit dem Prüfling mit. In diesem Verfahrensschritt können jedoch rotationssymmetrische Fehleranteile und Fehleranteile, die die Symmetrie der Anzahl der Drehstellungen aufweisen, nicht erfasst werden. Somit enthält das

Ergebnis des Verfahrensschritts (A) noch die M-welligen Prüflingsfehler sowie Beiträge, die auf den Prüfaufbau zurückgehen, also Prüfaufbaufehler.

[0024] Im nachfolgenden Schritt (B) wird die oben beschriebene erste Passe von den ersten Messwerten (also von den Rohdaten der ersten Messung) subtrahiert, um einen ersten Prüfaufbaufehler zu bestimmen. Dieser enthält gemeinsame nicht-mitdrehende Fehler der ersten Messreihe. Hierzu gehören vor allem Fehler, die auf eine nicht ideale Justage des Messaufbaus zurückgehen, z.B. Taumelfehler beim Rotieren des Prüflings. Weiterhin gehören dazu Fehler, die darin begründet liegen, dass die tatsächlich genutzte Referenzwelle von der idealerweise vorgesehenen Referenzwelle abweicht.

[0025] In einem folgenden Verfahrensschritt (C) wird der so ermittelte erste Prüfaufbaufehler zur Berechnung einer korrigierten ersten Passe verwendet. Diese ergibt sich aus den ersten Messwerten, also den Rohdaten der ersten Messung, durch Subtraktion des ersten Prüfaufbaufehlers.

[0026] Die bisher beschriebene Abfolge von Verfahrensschritten wird in dieser Anmeldung auch als erster Zyklus bzw. M-Zyklus bezeichnet. Ein M-Zyklus ist für sich allein genommen nicht in der Lage, M-wellige Prüflingsfehler und M-wellige Prüfaufbaufehler zu identifizieren, weil die zugrunde liegenden Rohdaten (erste Messwerte) auf M-Drehstellungen vorliegen.

[0027] Mit dem beanspruchten Verfahren ist es möglich, die M-welligen Fehler von den N-welligen Fehlern zu trennen. Hierzu wird nun, etwas verkürzt ausgedrückt, der korrigierte Prüflingsfehler mit M-Welligkeiten (also die rekonstruierte erste Passe) in die Rekonstruktion des N-Drehstellungszyklus eingespeist bzw. dort verarbeitet. Dort tragen die Rohdaten (zweite Messwerte der zweiten Messreihe) nur den N-welligen Prüflingsfehler und den N-welligen Prüfaufbaufehler. Eine M-Welligkeit wird in diesem Zyklus nur durch die Korrektur des M-Drehstellungszyklus eingetragen und durch die Rekonstruktion mit N-Drehstellungen unterdrückt. Anders ausgedrückt kann dadurch der M-wellige Prüflingsfehler vom M-welligen Prüfaufbaufehler getrennt werden.

[0028] In einem folgenden Schritt werden somit die Ergebnisse der ersten Messreihe und die Ergebnisse der zweiten Messreihe in besonderer Weise „miteinander verheiratet“. Gemäß einer Formulierung der Erfindung erfolgt dies in einem Verfahrensschritt (D) durch Subtrahieren der im Schritt (C) ermittelten korrigierten ersten Passe von den zweiten Messwerten, um einen zweiten Prüfaufbaufehler zu bestimmen. In diesem Schritt wird somit Information aus dem M-Zyklus in den N-Zyklus eingeführt.

[0029] Der so ermittelte zweite Prüfaufbaufehler wird nun in einem Schritt (E) dazu verwendet, um eine korrigierte zweite Passe zu berechnen, die aus den zweiten Messwerten, also den Rohdaten der zweiten Messreihe, durch Berücksichtigung des zweiten Prüfaufbaufehlers resultiert.

[0030] Danach wird in Schritt (F) die korrigierte zweite Passe verwendet, um den ersten Prüfaufbaufehler zu korrigieren. Dies erfolgt durch Subtrahieren der korrigierten zweiten Passe von den ersten Messwerten zur Bestimmung des ersten Prüfaufbaufehlers, der nun gemeinsame nicht-mitdrehende Fehler der ersten Messreihe und der zweiten Messreihe enthält.

[0031] Danach wird in einem Schritt (G) dieser korrigierte erste Prüfaufbaufehler verwendet, um eine nochmals korrigierte erste Passe zu berechnen.

[0032] Nach einer Rekonstruktion des N-Drehstellungszyklus wird dann dieses Rekonstruktionsergebnis wieder als Korrektur in die Rekonstruktion des M-Drehstellungszyklus eingespeist. Dies führt zu einer Korrektur bzw. zunehmenden Unterdrückung der N-welligen Prüflingsfehler.

[0033] Diese Abfolge von Verfahrensschritten kann so lange iterativ durchlaufen werden, bis ein hinreichend genaues Ergebnis für die Oberflächenform des Prüflings vorliegt, z.B. also bis ein bestimmtes Konvergenzkriterium erfüllt ist. Ein Schritt (H) umfasst daher einen Vergleich mit einem Konvergenzkriterium und abhängig vom Ergebnis des Vergleichs eine Wiederholung der genannten Schritte (A) bis (H).

[0034] Durch eine mehrfach wiederholte, also iterative Anwendung dieser Verfahrensschritte werden die M-welligen Prüflingsfehler, die N-welligen Prüflingsfehler sowie die M-welligen Prüfaufbaufehler und die N-welligen Prüfaufbaufehler immer besser voneinander getrennt, so dass im Endergebnis nur noch die gemeinsamen Vielfachen, also $N * M$, übrigbleiben. Dies ist insoweit analog zu dem eingangs erwähnten Verfahren aus der DE 100 58 650 A1.

[0035] Allerdings wird im Unterschied dazu eine Korrektur der N-Welligkeiten und der M-Welligkeit auf der gesamten vom Prüfling überstrichenen Fläche stattfinden, da in einem iterativen Verfahren die Ergebnisse von M-Zyklus und N-Zyklus wechselweise miteinander verrechnet werden. Diese Verrechnung wird im Folgenden auch als „Stitching“ bezeichnet. Dies bedeutet im Ergebnis, dass Information über den Prüfaufbaufehler für jeden Teil der Oberfläche ermittelt werden kann, der sich in irgendeinem Stadium der Messungen im Messbereich befand. Wird bei einer bestimmten Messung, d.h. bei einer bestimmten Drehstellung, für einen Teilbereich des Messbereichs keine Information erfasst (was in dieser Messung zu „bad pixels“ führen würde), so kann der Prüfaufbaufehler dennoch rekonstruiert werden, solange in irgendeiner der Drehstellungen dieser Bereich gemessen werden kann.

[0036] Durch „Stitching“ kann somit erreicht werden, dass keine Vervielfältigung von ungültigen Bildbereichen und/oder Mittelungskanten entstehen kann. Daher ist dieses Verfahren auch bei Prüflingen anwendbar, bei denen der interessierende Bereich nicht vollflächig-rotationssymmetrisch zur Prüflingsdrehachse ist. Dies kann beispielsweise bei Spiegeln der Fall sein, die eine außeraxiale Aussparung enthalten, um in einem mehrfach gefalteten Strahlengang einen vignettierungsfreien Durchlass für Strahlbündel zu schaffen, die zwischen anderen Spiegeln des optischen Systems verlaufen. Ein anderes Beispiel sind Oberflächen von optischen Elementen, deren Außenkontur nicht kreisförmig und zentriert zur Symmetrieachse der nominell rotationssymmetrischen Oberflächenform ist, z.B. ovale Spiegel.

[0037] Es kann ausreichen, nur genau zwei Messreihen durchzuführen und deren Ergebnisse gemeinsam auszuwerten. Bei manchen Ausführungsformen ist vorgesehen, dass drei oder mehr Messreihen, z.B. drei, vier oder fünf Messreihen, durchgeführt und deren Ergebnisse miteinander verrechnet werden. Dadurch können zum Preis einer höheren Messzeit ggf. genauere Ergebnisse erzielt werden.

Figurenliste

[0038] Weitere Vorteile und Aspekte der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und aus der Beschreibung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, die nachfolgend anhand der Figuren erläutert sind.

Fig. 1 zeigt schematisch den Aufbau einer interferometrischen Prüfvorrichtung zur Charakterisierung der Oberflächenform einer optischen Oberfläche eines Prüflings;

Fig. 2 zeigt einen Algorithmus der Auswertung bei einem Verfahren gemäß dem Stand der Technik (SdT);

Fig. 3 illustriert den Vermittlungseffekt der M-Welligkeit bei einem Verfahren des Standes der Technik und Probleme bei der Prüfung von Off-Axis-Aperturen;

Fig. 4 zeigt schematisch eine Abfolge von Verfahrensschritten einer Auswertoperation bei einer Ausführungsform der Erfindung.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

[0039] Im Folgenden wird ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Verfahrens und einer erfindungsgemäßen Messvorrichtung anhand der Charakterisierung der Oberflächenform der optischen Oberfläche eines Spiegels für ein Projektionsobjektiv oder ein Beleuchtungssystem einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage erläutert.

[0040] Das Verfahren kann mit unterschiedlichen interferometrischen Prüfvorrichtungen durchgeführt werden. **Fig. 1** zeigt in einer stark schematisierten Prinzipdarstellung den Aufbau einer Prüfvorrichtung 100 zur Charakterisierung der Oberflächenform einer optischen Oberfläche 210 eines Prüflings 200 in Form eines optischen Elements. Die Prüfvorrichtung ist beispielhaft mit einem optischen Aufbau nach Art eines Michelson-Interferometers dargestellt. Sie kann auch nach anderen Interferometer-Prinzipien arbeiten, z.B. kann die Prüfvorrichtung als Fizeau-Interferometer konfiguriert sein. Die Prüfung basiert auf Messergebnissen interferometrischer Messungen, weshalb die Prüfvorrichtung 100 auch als Messvorrichtung 100 bezeichnet werden kann.

[0041] Die interferometrische Prüfvorrichtung 100 weist u.a. eine Lichtquelle 110, ein Referenzelement 120, einen Strahlteiler 130 und eine mit einem Detektor ausgestattete Einrichtung 150 zur Erfassung der entstehenden Interferenzmuster auf. Diese kann z.B. eine Kamera aufweisen. Die Einrichtung 150 ist mit einer Steuereinheit 160 gekoppelt, die eine Auswerteeinheit 170 enthält, welche u.a. eine computerbasierte Datenverarbeitungseinheit umfasst, in welcher die Auswertoperationen zur Auswertung der aus den Interfero-

grammen abgeleiteten Messwerte durchgeführt werden. Die Steuereinheit 160 dient der Koordinierung und Steuerung von Operationen der automatischen Prüfvorrichtung.

[0042] Der Prüfling wird in einen drehbar gelagerten Prüflingshalter derart eingebaut, dass die zu prüfende Oberfläche 210 vollständig innerhalb eines Messbereichs 140 der Prüfvorrichtung angeordnet ist. Der Prüflingshalter ist über die Steuereinheit derart drehbar, dass der Prüfling um vorgebbare Winkelinkremente um eine Prüflingsdrehachse 220 gedreht und in bestimmten Drehstellungen angehalten werden kann.

[0043] Die Sollform der zu prüfenden Oberfläche 210 des Prüflings 200 ist rotationssymmetrisch (sphärisch oder asphärisch) zu einer Symmetrieachse der Oberfläche. Der Prüfling wird so aufgenommen, dass diese Symmetrieachse möglichst exakt der Prüflingsdrehachse entspricht.

[0044] An dem Prüfling werden interferometrische Messungen durchgeführt, wobei in jeder interferometrischen Messung ein Interferogramm zwischen einer von der Oberfläche 210 ausgehenden Prüfwelle und einer vom Referenzelement ausgehenden Referenzwelle ermittelt wird. Zwischen den Messungen wird die Drehstellung des Prüflings relativ zur Prüfvorrichtung durch begrenzte Drehung des Prüflings um die Prüflingsdrehachse 220 verändert. In einer Auswertoperation werden die Interferogramme bzw. die daraus abgeleiteten Messwerte gemeinsam zur Ermittlung einer Forminformation zur Charakterisierung der Oberflächenform der optischen Oberfläche ausgewertet.

[0045] Zur Bildung einer ersten Messreihe wird eine Anzahl von M Messungen durchgeführt. Dabei werden die M Messwerte für M Drehstellungen (M1, M2 etc.) mit einem Drehwinkelunterschied von $360^\circ/M$ erfasst. Zur Bildung einer zweiten Messreihe werden N Messwerte (N1, N2 etc.) für N Drehstellungen mit einem Drehwinkelunterschied von $360^\circ/N$ erfasst. Dabei sind M und N teilerfremde natürliche Zahlen. Die M Messwerte der ersten Messreihe werden hier auch als „erste Messwerte“ bezeichnet, entsprechend werden die N Messwerte der zweiten Messreihe auch als „zweite Messwerte“ bezeichnet. In **Fig. 1** ist die Lage von Drehstellungen am Beispiel von $M = 3$ und $N = 5$ dargestellt. In jeder Messreihe sind die Drehstellungen in äquidistanten Abständen bzw. Winkelstellungen über eine volle Drehung des Prüflings 200 angeordnet.

[0046] Die Vorgehensweise entspricht in diesen allgemeinen Aspekten dem in der DE 100 58 650 A1 beschriebenen Verfahren, modifiziert dieses aber, um bestimmte spezifische Nachteile zu vermeiden.

[0047] Zum besseren Verständnis sei zunächst das aus der DE 100 58 650 A1 bekannte Verfahren näher erläutert, das im Folgenden auch als „N+M-Verfahren“ bezeichnet wird. Der diesem konventionellen Verfahren zugrunde liegende Algorithmus ist in **Fig. 2** schematisch dargestellt. Bei dem Verfahren werden zunächst die Messdaten bzw. Messwerte für äquidistante $360^\circ/N$ -Drehstellungen und $360^\circ/M$ -Drehstellungen aufgenommen. Diese Serien bzw. Zyklen von Messwertaufnahmen sind in **Fig. 1** mit N-ZYK (für den N-Zyklus) bzw. M-ZYK (für den M-Zyklus) bezeichnet. Die jeweiligen Rohdaten werden dann in den Schritten $REK(P_N)$ bzw. $REK(P_M)$ jeweils zu einer Passe des jeweiligen Zyklus rekonstruiert. In **Fig. 2** steht P_N für die aus dem N-Zyklus abgeleitete N-Passe, also die Rekonstruktion aus N-Drehstellungen. Analoges gilt für P_M , also die Passe aus dem M-Zyklus (N-Passe). Die Rekonstruktion $REK(P_N)$ der N-Drehstellungen zur Berechnung der Passe P_N kann wie folgt dargestellt werden:

$$Passe_N = Passe + Fehler^{rot} + PasseAufbau_N.$$

[0048] Analoges gilt für den M-Zyklus. Der Parameter „Fehler^{rot}“ beinhaltet dabei die rotationssymmetrischen Prüflings- und Prüfaufbaufehler, also Fehler, die durch Drehmittlung nicht bestimmt werden können. Der Parameter „PasseAufbau_N“ bezeichnet nicht-trennbare N-wellige Fehler von Prüfling und Prüfaufbau. Die rekonstruierten Passen P_N und P_M enthalten jeweils den M-welligen Prüflings- und Prüfaufbaufehler.

[0049] Diese lassen sich aufgrund der begrenzten Anzahl von Drehstellungen nicht voneinander trennen. Ein Gewinn dieses „N+M-Verfahrens“ besteht darin, durch die rekonstruierten Passen P_N bzw. P_M mit N- und M-Welligkeit die jeweils N-welligen und M-welligen Prüflings- und Prüfaufbaufehler voneinander zu trennen. Dadurch kann erreicht werden, dass im Endergebnis nur noch die Welligkeiten des kleinsten gemeinsamen Vielfachen $N \cdot M$ vorhanden sind.

[0050] Um dieses Ziel zu erreichen, wird in einem folgenden Verfahrensschritt DIFF zunächst die Differenz der beiden rekonstruierten Passen gebildet, was in **Fig. 2** durch das Symbol „-“ dargestellt ist. Diese Differenz trägt dann die N-Welligkeit und die M-Welligkeit des Prüflings und des Prüfaufbaufehlers. Durch Differenzbildung wird der Parameter $Korr_{NM}$ errechnet, für den gilt:

$$\text{Korr}_{\text{NM}} = \text{PasseAufbau}_M - \text{PasseAufbau}_N$$

[0051] Im folgenden Schritt MITT wird diese gebildete Differenz in N äquidistanten $360^\circ/N$ -Schritten gedreht und die jeweiligen gedrehten Differenzen gemittelt. Dies wird beschrieben durch:

$$\text{Korr}_{\text{NM}_N} = \text{PasseAufbau}_N + \text{PasseAufbau}_{N^*M}$$

[0052] Dadurch wird die M-Welligkeit durch die Mittelung um den Faktor N unterdrückt. Damit erhält man eine gute Näherung für die N-Welligkeit des Prüfaufbaufehlers mit Restfehlern der N^*M -Welligkeit.

[0053] Im Schritt KORR kann nun diese N-Welligkeit mit Subtraktion von der rekonstruierten N-Drehstellungsmessung korrigiert werden. Die Korrektur der Passe_M kann wie folgt beschrieben werden:

$$\text{Passe}_{N^*M} = \text{Passe}_M - \text{Korr}_{\text{NM}_N} = \text{Passe} + \text{Fehler}^{\text{rot}} + \text{PasseAufbau}_{N^*M}$$

[0054] Es verbleiben dann im Endergebnis nur noch die N^*M -welligen Prüflings- und Prüfaufbaufehler, welche bei diesem Verfahren nicht voneinander getrennt werden können.

[0055] Nach den Erkenntnissen der Erfinder besteht ein praktischer Nachteil dieses Verfahrens darin, dass bei gewissen Prüflingen die Anwendung dieses $N+M$ -Drehmittlungsverfahrens zu großen Bereichen im Passe -Messergebnis führen kann, in welchen Lücken im Messergebnis existieren. Daher ist dieses „klassische“ $N+M$ -Drehmittlungsverfahren nur für vollflächigrotationssymmetrische Aperturen definiert. Diese werden hier auch als „On-Axis-Aperturen“ bezeichnet. Eine On-Axis-Apertur liegt vor, wenn die zu prüfende Oberfläche zur Prüflingsdrehachse rotationssymmetrisch und vollflächig (d.h. z.B. ohne außeraxiale Lücken bzw. Aussparungen) ist.

[0056] Es gibt jedoch viele Prüflingsgeometrien, bei denen die zu prüfende Oberfläche nicht vollflächig-rotationssymmetrisch zur Prüflingsdrehachse ist. Ein Beispiel dafür sind Spiegelflächen mit außeraxialen und/oder nicht-kreisförmigen Aussparungen und/oder mit einer nicht-kreisförmigen äußeren Umrandung. Diese Fälle werden hier als Fälle mit „Off-Axis-Apertur“ bezeichnet.

[0057] Die Erfinder haben erkannt, dass das Hauptproblem der begrenzten Anwendbarkeit des $N+M$ -Drehmittlungsverfahrens bei Off-Axis-Aperturen in der verwendeten Vermittlung der N-welligen Prüflings- und Prüfaufbaufehler zur Bestimmung des Terms $\text{Korr}_{\text{NM}_N}$ liegt. Dadurch, dass bei Off-Axis-Systemen nicht die volle Prüfaufbauapertur gemessen wird, besteht das Messbild (je nach Gestalt des Prüflings) zu unterschiedlich großen Anteilen aus ungültigen Pixeln, also Bildelementen, denen keine Flächenelemente der vermessenen Fläche zugeordnet sind.

[0058] Das daraus folgende Mittelungsproblem bei einem Off-Axis $N+M$ -Verfahren wird anhand von **Fig. 3** erläutert. Diese zeigt schematisch eine Draufsicht auf die zu messende Oberfläche eines Prüflings 200, die eine kreisrunde äußere Grenze hat, deren Zentrum als Prüflingsdrehachse 220 genutzt wird. Exzentrisch zum Zentrum ist im Beispielsfall eine Aussparung 230, die auch als Durchbrechung ausgebildet sein kann, in dem Spiegel vorgesehen. Die kleinen Quadratsymbole repräsentieren eine exemplarische 4-Welligkeit aus einem N-Zyklus, die Kreuze repräsentieren eine exemplarische 3-Welligkeit aus einem M-Zyklus.

[0059] **Fig. 3** zeigt deutlich den Vermittelungseffekt der M-Welligkeit (in diesem Fall für $M=3$). Die Teilbilder ST1, ST2, ST3 und ST4 zeigen vier jeweils um 90° azimuthal versetzte Drehstellungen eines Prüflings 200 in Form eines Spiegels mit einer außerhalb des Zentrums (Prüflingsdrehachse 220) liegenden Aussparung 230. Außerdem erkennt man bei der Teilfigur $\text{Korr}_{\text{NM}_N}$ die Problematik bei der Vervielfältigung der ungültigen Bildbereiche. Im Fall von anderen Mittelungsmethoden (z.B. solchen, bei denen die Werte in den ungültigen Bereichen künstlich auf „0“ gesetzt werden) entstehen dennoch Kanten an den Bereichsgrenzen, die das Ergebnis verfälschen. Aus diesem Grunde funktioniert das klassische $N+M$ -Verfahren nur für vollflächige On-Axis Aperturen gut.

[0060] An dieser Stelle sei kurz auf das in der DE 10 2017 217 371 A1 beschriebene Verfahren verwiesen. Dieses ist dazu geeignet, vollflächig Prüfaufbaufehler zu korrigieren. Die dort angewandte Vorgehensweise wird in der vorliegenden Anmeldung auch als „iteratives Stitching“ bezeichnet, da in einem iterativen Verfahren unterschiedliche Messergebnisse miteinander verrechnet werden. Auch dort beginnt das Verfahren mit der Aufnahme der notwendigen Messdaten. Dabei wird üblicherweise nur ein einziger Messzyklus mit einer

entsprechenden Anzahl von N-Drehstellungen aufgenommen. Die Anzahl der einzelnen Messungen dieses Zyklus ist in der Regel deutlich größer als beim eben beschriebenen N+M-Verfahren. Mit dem Verfahren können N-wellige Prüflingsfehler und N-wellige Prüfaufbaufehler nicht voneinander getrennt werden.

[0061] Hier schafft das Verfahren gemäß der beanspruchten Erfindung eine Verbesserung. Anhand des schematischen Diagramms in **Fig. 4** wird ein Ausführungsbeispiel erläutert. **Fig. 4** zeigt schematisch eine Abfolge von Verfahrensschritten einer Auswerteoperation, mit der die mit unterschiedlichen Drehstellungen erfassten Messwerte ausgewertet werden. Die mit kurz gestrichelten Linien umrahmten Textfelder (rechts mit M-ZYK bezeichnet) beziehen sich auf einen M-Zyklus, also die Messreihe mit M-Messwerten. Diese wird hier verallgemeinert auch als erste Messreihe mit M ersten Messungen bezeichnet. Bezugszeichen N-ZYK bezeichnet entsprechend einen N-Zyklus, der zur zweiten Messreihe mit N-Messwerten (zweite Messwerte) gehört. Die zugehörigen Textfelder sind mit lang gestrichelten Linien umrahmt. Die gekrümmten Pfeile, welche Blöcke im unteren Teil des Diagramms seitlich verbinden, deuten den iterativen Charakter des Auswerteverfahrens an.

[0062] Um das aus dem Stand der Technik bekannte N+M-Verfahren auf Off-Axis Systeme anwenden zu können, werden bei der Auswertung besondere Schritte durchgeführt, um die N-welligen und die M-welligen Prüflingsfehler und Prüfaufbaufehler voneinander zu trennen. Das bedeutet hier, dass durch iteratives Vorgehen der Einfluss des Prüfaufbaufehlers für alle relevanten Messpunkte auf der zu prüfenden Oberfläche rekonstruiert werden kann.

[0063] Das Prüfverfahren beginnt mit der Aufnahme der Messwerte in der Weise, wie es beispielhaft anhand von **Fig. 1** für das klassische N+M-Verfahren beschrieben wurde. Es werden also in einer ersten Messreihe beispielsweise für M-Drehstellungen entsprechend dort aufgenommene Interferogramme erfasst und daraus erste Messwerte abgeleitet. Es ist ausreichend einen N-Drehstellungszyklus und M-Drehstellungszyklus mit äquidistanten Rotationsdrehstellungen aufzunehmen.

[0064] Unterschiede zum bekannten N+M-Verfahren, die es ermöglichen, basierend auf diesem Verfahren auch Off-Axis Systeme hinsichtlich ihrer Oberflächenform zu prüfen, finden in der Auswertung statt.

[0065] Das beispielhafte Verfahren in **Fig. 4** beginnt mit einer Iteration, die hier exemplarisch im M-Zyklus durchgeführt wird. Dabei wird zunächst auf Basis der ersten Messungen (bei M-Drehstellungen) eine erste Passe P1 berechnet. Anschaulich betrachtet ist die erste Passe eine gemeinsame mitdrehende Passe der ersten Messreihe. Man geht dabei davon aus, dass diejenigen Fehler, die bei jeder Drehstellung in der entsprechenden Drehstellung am entsprechenden Ort auftauchen, zu dem (gedrehten) Prüfling und nicht zum (stationären) Prüfaufbau gehören. Diese erste Passe P1 ist sozusagen eine erste Näherung an die tatsächlich zu bestimmende Passe, also die Oberflächenform des Prüflings.

[0066] Im nächsten Schritt wird der erste Prüfaufbaufehler PA1 berechnet, der die gemeinsamen nichtmitdrehenden Fehler der ersten Messreihe enthält. Dazu wird die oben bestimmte erste Passe P1 von den ersten Messwerten subtrahiert. Man subtrahiert also die mit dem Prüfling mitdrehenden Fehler von dem nicht mit dem Prüfling mitdrehenden Fehlern und ordnet diese dem Prüfling bzw. dem Prüfaufbau zu.

[0067] Der auf diese Weise bestimmte erste Prüfaufbaufehler PA1 wird dann im nächsten Verfahrensschritt dazu verwendet, eine korrigierte erste Passe P1K zu berechnen. Diese ergibt sich aus der ersten Passe P1 durch Subtraktion des ersten Prüfaufbaufehlers PA1. Dieses Ergebnis, also die korrigierte erste Passe P1K, trägt dann noch den M-welligen Prüflingsfehler und den M-welligen Prüfaufbaufehler in sich, weil die zugrundeliegenden Rohdaten, d.h. der ersten Messwerte, auf M-Drehstellungen vorliegen.

[0068] Um nun die M-welligen von den N-welligen Fehlern zu trennen, wird der rekonstruierte Prüflingsfehler, also die korrigierte erste Passe P1K, mit der enthaltenen M-Welligkeit in die entsprechende Rekonstruktion des N-Drehstellungszyklus N-ZYK eingeführt. Dieser Wechsel in den anderen Zyklus wird durch den schrägen Pfeil W1 symbolisiert. Im Bild von **Fig. 4** wird somit die korrigierte erste Passe P1K von den zweiten Messwerten, d.h. von den Rohdaten des N-Zyklus subtrahiert. Dadurch wird basierend auf den Messwerten des N-Zyklus ein zweiter Prüfaufbaufehler PA2 bestimmt. Dieser wird im nachfolgenden Verfahrensschritt dazu verwendet, eine korrigierte zweite Passe P2K zu berechnen. Diese ergibt sich aus den Rohdaten der zweiten Messreihe (zweite Messwerte) durch Berücksichtigung des zweiten Prüfaufbaufehlers.

[0069] Nach dieser Rekonstruktion des N-Drehstellungszyklus wird dieses Rekonstruktionsergebnis (nämlich die korrigierte zweite Passe P2K) wieder als Korrektur in die Rekonstruktion des N-Drehstellungszyklus

eingeführt, was durch den schrägen Pfeil W2 symbolisiert wird. Dieser Verfahrensschritt führt zu einer Unterdrückung bzw. Korrektur der N-welligen Prüflingsfehler.

[0070] Dann wird die korrigierte zweite Passe P2K zur Korrektur des ersten Prüfaufbaufehlers PA1 genutzt, indem die korrigierte zweite Passe P2K von den Rohdaten des N-Zyklus, also von den ersten Messwerten subtrahiert wird. Der daraus resultierende korrigierte erste Prüfaufbaufehler PA1K enthält dann nur noch die gemeinsamen Welligkeiten Fehler der ersten Messreihe und der zweiten Messreihe, also sowohl des M-Zyklus als auch die N-Zyklus.

[0071] Durch die iterative Anwendung dieses Verfahrens werden die M-welligen und N-welligen Prüflings- und Prüfaufbaufehler immer besser voneinander getrennt, so dass im Endergebnis idealerweise nur noch die gemeinsamen Vielfachen, also $N \cdot M$, wie beim klassischen N+M-Verfahren, übrigbleiben. Der Algorithmus nähert sich dem Endergebnis allmählich an. Die Berechnung kann beendet werden, wenn ein Vergleich des jeweils erzielten Ergebnisses mit einem Konvergenzkriterium zeigt, dass das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Im andern Fall würde die Iterationsschleife wenigstens ein weiteres Mal durchlaufen.

[0072] Im Endergebnis ERG bleiben nur noch die gemeinsamen Vielfachen, also $N \cdot M$ übrig, was insoweit dem klassischen N+M-Verfahren entspricht. Dadurch, dass jedoch beim vorliegenden Verfahren bei der Rekonstruktion nun ein iteratives miteinander Verrechnen der Ergebnisse der beiden Zyklen mit unterschiedlichen Welligkeiten vorgenommen wird (iteratives Stitching) kann die Korrektur der N- und M-Welligkeiten auf der gesamten vom Prüfling überstrichenen Fläche stattfinden, so dass keine Vervielfältigung der ungültigen Bildbereiche oder Mittelungskanten (wie in **Fig. 3** dargestellt) entstehen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform einer optischen Oberfläche eines optischen Elements, wobei

das optische Element als Prüfling in eine interferometrische Prüfvorrichtung derart eingebaut wird, dass die Oberfläche vollständig innerhalb eines Messbereichs der Prüfvorrichtung angeordnet ist,

an dem Prüfling mehrere interferometrische Messungen durchgeführt werden und

zwischen den Messungen eine Drehstellung des Prüflings relativ zur Prüfvorrichtung durch begrenzte Drehung des Prüflings um eine Prüflingsdrehachse verändert wird,

wobei zur Bildung einer ersten Messreihe durch erste Messungen M erste Messwerte für M Drehstellungen mit einem Drehwinkelunterschied von $360^\circ/M$ und zur Bildung einer zweiten Messreihe N zweite Messwerte für N Drehstellungen mit einem Drehwinkelunterschied von $360^\circ/N$ erfasst werden, wobei M und N teilerfremde natürliche Zahlen sind, und

in einer Auswertoperation Messwerte gemeinsam zur Ermittlung einer Forminformation zur Charakterisierung der Oberflächenform der optischen Oberfläche ausgewertet werden, wobei in der Auswertoperation folgende Schritte iterativ durchgeführt werden

(A) Berechnen einer ersten Passe auf Basis der ersten Messungen, wobei die erste Passe eine gemeinsame mitdrehende Passe der ersten Messreihe ist;

(B) Subtrahieren der ersten Passe von den ersten Messwerten zur Bestimmung eines ersten Prüfaufbaufehlers, der gemeinsame nicht-mitdrehende Fehler der ersten Messreihe enthält;

(C) Verwenden des ersten Prüfaufbaufehlers zur Berechnung einer korrigierten ersten Passe, die aus der ersten Passe durch Subtraktion des ersten Prüfaufbaufehlers resultiert;

(D) Subtrahieren der korrigierten ersten Passe von den zweiten Messwerten zur Bestimmung eines zweiten Prüfaufbaufehlers;

(E) Verwenden des zweiten Prüfaufbaufehlers zur Berechnung einer korrigierten zweiten Passe, die aus den zweiten Messwerten durch Berücksichtigung des zweiten Prüfaufbaufehlers resultiert;

(F) Verwenden der korrigierten zweiten Passe zur Korrektur des ersten Prüfaufbaufehlers durch Subtrahieren der korrigierten zweiten Passe von den ersten Messwerten zur Bestimmung eines korrigierten ersten Prüfaufbaufehlers, der gemeinsame nicht-mitdrehende Fehler der ersten Messreihe und der zweiten Messreihe enthält;

(G) Verwenden des korrigierten ersten Prüfaufbaufehlers zur Berechnung einer nochmals korrigierten ersten Passe;

(H) Vergleichen des Ergebnisses mit einem Konvergenzkriterium und optionale Wiederholung der Schritte

(A) bis (H) in Abhängigkeit von einem Vergleichsergebnis.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Prüfling in Form eines Spiegels (200) geprüft wird, der eine reflektive Oberfläche (210) aufweist, deren Flächenausdehnung keine Rotationssymmetrie zu einer Symmetrieachse aufweist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Spiegel eine exzentrische Durchbrechung (230) aufweist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass drei oder mehr Messreihen durchgeführt und deren Ergebnisse miteinander verrechnet werden.

5. Vorrichtung (100) zur Charakterisierung der Oberflächenform einer optischen Oberfläche eines optischen Elements, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung (100) dazu konfiguriert ist, ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche auszuführen.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

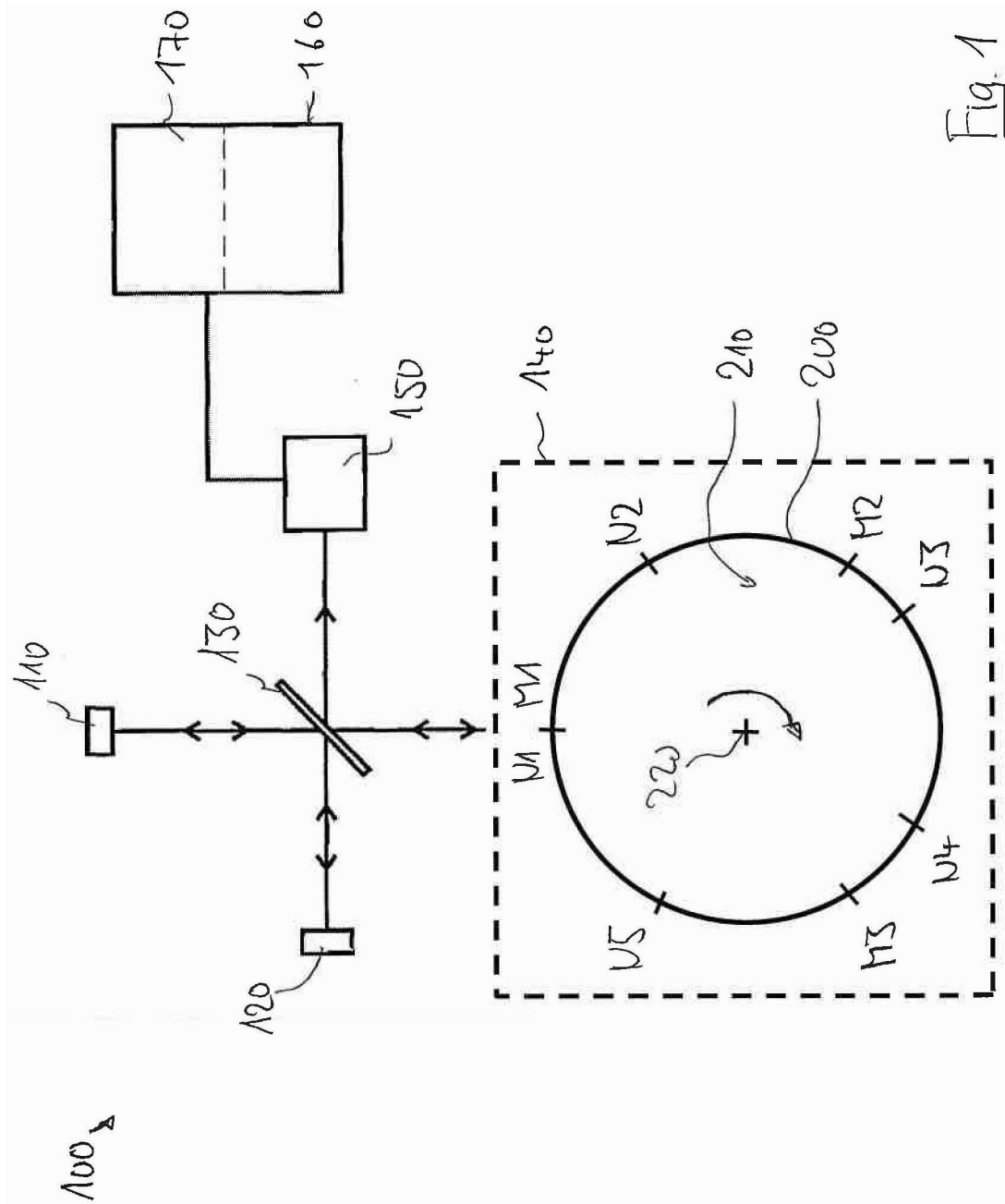


Fig. 1

