



(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2017 217 371.8

(51) Int Cl.: **G01B 9/02 (2006.01)**

(22) Anmeldetag: 29.09.2017

G01B 11/24 (2006.01)

(43) Offenlegungstag: 04.04.2019

G03F 7/20 (2006.01)

G01M 11/00 (2006.01)

G01M 11/02 (2006.01)

(71) Anmelder:

Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	11 2009 005 390	B4
US	6 956 657	B2
US	9 128 004	B2
US	2016 / 0 085 061	A1

(72) Erfinder:

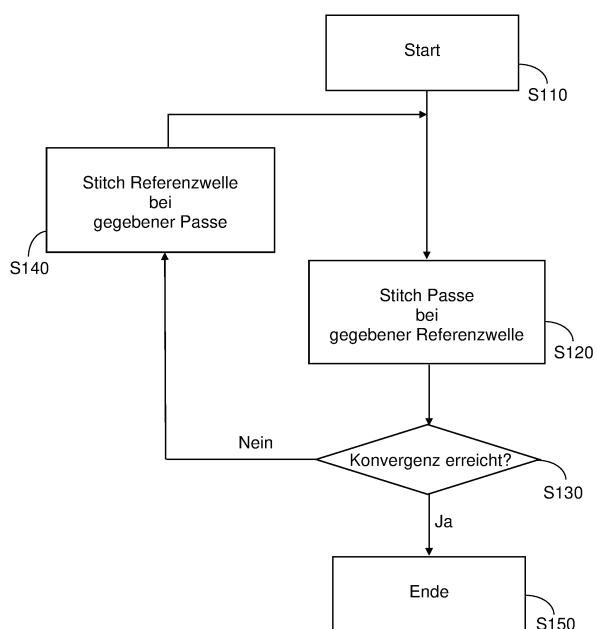
Riepenhausen, Frank, 73447 Oberkochen, DE;
Schröter, Martin, 73447 Oberkochen, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

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

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, insbesondere eines Spiegels oder einer Linse einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage. Ein erfindungsgemäßes Verfahren weist folgende Schritte auf: Durchführen einer Mehrzahl von interferometrischen Messungen, bei welchen jeweils ein Interferogramm zwischen einer von jeweils einem Abschnitt des optischen Elements ausgehenden Prüfwelle und einer Referenzwelle aufgenommen wird, wobei zwischen diesen Messungen die Position des optischen Elements relativ zur Prüfwelle verändert wird, und Berechnen der Passe des optischen Elements auf Basis dieser Messungen, wobei dieses Berechnen iterativ in solcher Weise erfolgt, dass in einer Mehrzahl von Iterationsschritten die Passe des optischen Elements jeweils unter Durchführung einer Vorrwärtsrechnung ermittelt wird, wobei jedem dieser Iterationsschritte jeweils eine auf Basis des vorangegangen Iterationsschrittes angepasste Referenzwelle zugrundegelegt wird.



Beschreibung**HINTERGRUND DER ERFINDUNG****Gebiet der Erfindung**

[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.

Stand der Technik

[0002] Mikrolithographie wird zur Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, wie beispielsweise integrierter Schaltkreise oder LCD's, angewendet. Der Mikrolithographieprozess wird in einer sogenannten Projektionsbelichtungsanlage durchgeführt, welche eine Beleuchtungseinrichtung und ein Projektionsobjektiv aufweist. Das Bild einer mittels der Beleuchtungseinrichtung beleuchteten Maske (= Retikel) wird hierbei mittels des Projektionsobjektivs auf ein mit einer lichtempfindlichen Schicht (Photoresist) beschichtetes und in der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnetes Substrat (z.B. ein Siliziumwafer) projiziert, um die Maskenstruktur auf die lichtempfindliche Beschichtung des Substrats zu übertragen.

[0003] In für den EUV-Bereich ausgelegten Projektionsobjektiven, d.h. bei Wellenlängen von z.B. etwa 13 nm oder etwa 7 nm, werden mangels Verfügbarkeit geeigneter lichtdurchlässiger refraktiver Materialien Spiegel als optische Komponenten für den Abbildungsprozess verwendet. Typische für EUV ausgelegte Projektionsobjektive, wie z.B. aus US 2016/0085061 A1 bekannt, können beispielsweise eine bildseitige numerische Apertur (NA) im Bereich von NA = 0.55 aufweisen und bilden ein (z.B. ringsegmentförmiges) Objektfeld in die Bildebene bzw. Waferebene ab.

[0004] Mit der Erhöhung der bildseitigen numerischen Apertur (NA) geht typischerweise 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 eine anspruchsvolle Herausforderung darstellt.

[0005] **Fig. 2a** zeigt eine schematische Darstellung zur Erläuterung eines Funktionsprinzips einer möglichen herkömmlichen interferometrischen Prüfanordnung zur Prüfung eines Spiegels **201**. Gemäß **Fig. 2a** wird in einer Fizeau-Anordnung ein Interferogramm zwischen an einer Referenzfläche **210** („Fizeau-Platte“) reflektiertem Referenzlicht (im Weiteren als „Referenzwelle“ bezeichnet) und einem an dem Spiegel **201** reflektierten Messlicht (im Weiteren auch als „Prüfwelle“ bezeichnet) erzeugt. Dabei wird im Beispiel von **Fig. 2a** das Messlicht durch ein Computer-generiertes Hologramm (CGH) **220** zu einer asphärischen Wellenfront geformt, die mathematisch exakt der „Prüflingsform“ (d.h. der Form des betreffenden Spiegels **201**) in einem Sollabstand entspricht. Die von der Referenzfläche **210** einerseits und dem betreffenden Spiegel **201** bzw. Prüfling andererseits reflektierten Wellenfronten interferieren miteinander in einem (in **Fig. 3** im Gesamtaufbau schematisch und beispielhaft dargestellten) Interferometer **205**, wobei in **Fig. 3** für das Interferometer **205** ein Kollimator **309**, eine Strahlteilerplatte **308**, eine Blende **307**, ein Okular **306** und eine CCD-Kamera **304** sowie eine Lichtquelle **303** dargestellt sind. Mit der CCD-Kamera **304** wird ein Interferogramm des jeweiligen Spiegels aufgenommen. Wie in **Fig. 2a** durch den Doppelpfeil angedeutet wird der Spiegel **201** in einer Mehrzahl von Messschritten in unterschiedliche Positionen bewegt, wobei lediglich schematisch zwei unterschiedliche Positionen „A“ und „B“ angedeutet sind.

[0006] Die Durchführung einer Mehrzahl von Messschritten in unterschiedlichen Positionen des Spiegels **201** dient insbesondere dazu, die (z.B. nicht als Ganzes in einer einzigen interferometrischen Messung erfassbare) Oberfläche des Spiegels **201** aus mehreren, einander überlappenden interferometrischen Einzelmessungen von sogenannten „Subaperturen“, welche für sich jeweils nicht die komplette Oberfläche abdecken, zusammenzusetzen. In **Fig. 2b** sind beispielhaft die Lagen einiger von mehreren hundert Subaperturen einer Messung eines größeren Spiegels dargestellt. Hierbei kann aus den einzelnen Subaperturen die letztlich zu bestimmende Passe des Spiegels bzw. Prüflings (d.h. die Abweichung von einer vorgegebenen Sollform der Oberfläche) rekonstruiert werden, wobei in grundsätzlich für sich bekannter Weise zum einen jeweils eine Transformation der Subaperturen in ein gemeinsames Raster auf dem Prüfling unter Berücksichtigung der jeweiligen Position des Prüflings und zum anderen eine Anpassung der Subaperturen aneinander unter Verwendung sogenannter Kompensatoren bzw. Sensitivitäten (zur Erzielung einer möglichst guten Übereinstim-

mung der einzelnen transformierten Subaperturen in ihren Überlappungsbereichen) vorgenommen wird. Das vorstehend beschriebene Konzept wird mitunter auch als „Stitching“ bezeichnet.

[0007] Ein hierbei in der Praxis auftretendes Problem ist jedoch, dass der interferometrische Messaufbau selbst bzw. die darin befindlichen optischen Komponenten ihrerseits Abweichungen von der perfekten Oberflächenform aufweisen. Hiermit einhergehende Fehler der Referenzwelle werden bei dem vorstehend beschriebenen Verfahren jedoch entweder gar nicht oder nur unzureichend berücksichtigt, was wiederum eine fehlerhafte Passe-Rekonstruktion und damit letztlich eine unzutreffende Charakterisierung des betreffenden optischen Elements bzw. Spiegels zur Folge hat.

[0008] Zum Stand der Technik wird lediglich beispielhaft auf US 6,956,657 B2 verwiesen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0009] Vor dem obigen Hintergrund ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, insbesondere eines Spiegels oder einer Linse einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, bereitzustellen, welche eine zuverlässige Charakterisierung der Oberflächenform unter zumindest teilweiser Vermeidung der vorstehend beschriebenen Probleme ermöglichen.

[0010] Diese Aufgabe wird durch das Verfahren gemäß den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 bzw. die Vorrichtung gemäß den Merkmalen des nebengeordneten Patentanspruchs 12 gelöst.

[0011] Ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements weist folgende Schritte auf:

- Durchführen einer Mehrzahl von interferometrischen Messungen, bei welchen jeweils ein Interferogramm zwischen einer von jeweils einem Abschnitt des optischen Elements ausgehenden Prüfwelle und einer Referenzwelle aufgenommen wird, wobei zwischen diesen Messungen die Position des optischen Elements relativ zur Prüfwelle verändert wird;
- Berechnen der Passe des optischen Elements auf Basis dieser Messungen;
- wobei dieses Berechnen iterativ in solcher Weise erfolgt, 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 zugrundegelegt wird.

[0012] Der Erfindung liegt insbesondere das Konzept zugrunde, bei der Berechnung der Passe eines optischen Elements auf Basis der Durchführung einer Mehrzahl von interferometrischen Messungen die Referenzwelle nicht etwa unter Vernachlässigung oder nur einmaliger, unzureichender Approximation der o.g. Fehler im interferometrischen Messaufbau bzw. den darin befindlichen optischen Komponenten als konstant zu betrachten, sondern stattdessen die Referenzwelle insoweit als variablen Parameter anzusehen, als in einem iterativen Verfahren abwechselnd die Passe des optischen Elements einerseits und die Referenzwelle andererseits - und unter Berücksichtigung der jeweils im vorangegangenen Iterationsschritt erhaltenen Information - bestimmt wird. Hierbei kann die Anzahl der Iterationsschritte z.B. vom Erreichen eines vorgegebenen Konvergenzkriteriums abhängig gemacht oder auch fest vorgegeben werden.

[0013] Konkret kann erfindungsgemäß z.B. zunächst unter Vorgabe einer bestimmten Referenzwelle eine erstmalige Bestimmung der Passe unter Anwendung der eingangs erwähnten und im Weiteren noch detaillierter erläuterten „Stitching-Methode“ erfolgen, woraufhin - unter Anwendung einer Rückwärtsrechnung und ebenfalls unter Anwendung der Stitching-Methode - eine neue Bestimmung der Referenzwelle unter Berücksichtigung der ermittelten Passe erfolgt. Die auf diese Weise erhaltene, genauere Information über die Referenzwelle kann dann im nächsten Iterationsschritt zur verbesserten Bestimmung der Passe verwendet werden, etc.

[0014] Die vorstehend beschriebene, abwechselnde Durchführung jeweils einer Vorwärtsrechnung zur Passe-Bestimmung und einer Rückwärtsrechnung zur Bestimmung der Referenzwelle führt im Ergebnis dazu, dass die Referenzwelle im Laufe der Iteration pixelaufgelöst mitbestimmt wird und so insgesamt eine genauere Passe-Bestimmung realisiert werden kann.

[0015] Zu beachten ist, dass die Durchführung des vorstehend beschriebenen iterativen Verfahrens jeweils eine rechnerische „Umrasterung“ bzw. Transformation zwischen dem Koordinatensystem bzw. Pixelraster des Prüflings einerseits und dem Koordinatensystem bzw. Pixelraster des Messaufbaus andererseits erfordert. Eine solche, bereits beim herkömmlichen (d.h. nicht-iterativen) Stitching-Verfahren erforderliche Umrasterung bzw. Transformation ist bei dem erfindungsgemäßen Verfahren nicht nur vom Koordinatensystem des Messaufbaus auf das Koordinatensystem des Prüflings, sondern auch in umgekehrter Richtung erforderlich, da nach einer in einem Iterationsschritt erfolgten Ermittlung der Passe die anschließende Ermittlung der Referenzwelle wiederum ein Herausrechnen der Passe aus den jeweiligen Roh-Messdaten (d.h. im Koordinatensystem des Messaufbaus) erfordert.

[0016] Mit anderen Worten wird die jeweils in einem Iterationsschritt ermittelte Passe rückwärts gerechnet auf das entsprechende Rohdatenbild und dann zum Stitchen der Referenzwelle subtrahiert bzw. herausgerechnet. Des Weiteren ermöglicht es das erfindungsgemäße iterative Verfahren auch, bei der Mehrzahl interferometrischer Messungen aufgenommene Interferogramme korrekt zu verarbeiten bzw. auszuwerten, bei denen infolge der jeweiligen Position des Prüflings nur ein Teil der Referenzwelle zum jeweiligen Messergebnis beiträgt bzw. in dem jeweiligen Interferogramm „sichtbar“ ist. Dies wird dadurch erreicht, dass bei dem erfindungsgemäßen Verfahren das eingangs beschriebene, im Weiteren noch detaillierter erläuterte „Stitching“ nicht nur bei der Bestimmung der Passe des Prüflings, sondern auch bei der in den einzelnen Iterationsschritten erfolgenden Rekonstruktion der Referenzwelle Anwendung findet.

[0017] Die Wahl der Start-Referenzwelle kann grundsätzlich in beliebiger geeigneter Weise erfolgen, da die jeweilige Wahl i.d.R. nur die Geschwindigkeit der Konvergenz des iterativen Verfahrens beeinflusst. In beispielhaften Ausführungsformen kann der Mittelwert aller Messungen bei jeweils vollständiger Füllung der Subaperturen, eine in jeweils einer vorhergehenden Messung oder Auswertung bestimmte Referenzwelle oder auch eine „Nullwellenfront“ als Start-Referenzwelle gewählt werden.

[0018] Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Durchführung der interferometrischen Messungen eine Aufnahme von Subaperturen, welche jeweils nicht die komplette Oberfläche des Spiegels abdecken.

[0019] Gemäß einer Ausführungsform wird die jeweils angepasste Referenzwelle unter Durchführung einer Rückwärtsrechnung ermittelt.

[0020] Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Durchführung der Rückwärtsrechnung ein Herausrechnen der Passe aus den jeweiligen Messdaten.

[0021] Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Durchführung der Vorwärtsrechnung jeweils eine Umrasterung bzw. Transformation von einem ersten Koordinatensystem eines bei der Durchführung der interferometrischen Messungen verwendeten Messaufbaus auf ein zweites Koordinatensystem des optischen Elements.

[0022] Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Durchführung der Rückwärtsrechnung jeweils eine Umrasterung bzw. Transformation von einem zweiten Koordinatensystem des optischen Elements auf ein erstes Koordinatensystem eines bei der Durchführung der interferometrischen Messungen verwendeten Messaufbaus.

[0023] Gemäß einer Ausführungsform wird das iterative Berechnen bis zur Erfüllung eines vorgegebenen Konvergenzkriteriums durchgeführt.

[0024] Gemäß einer Ausführungsform wird das iterative Berechnen für eine vorgegebene Anzahl von Iterationsschritten durchgeführt.

[0025] Gemäß einer Ausführungsform erfolgt die Veränderung der Position des optischen Elements derart, dass ein Krümmungsmittelpunkt des optischen Elements an Ort und Stelle bleibt.

[0026] In Ausführungsformen kann bei Durchführung der Mehrzahl von interferometrischen Messungen der Prüfling auf einem Drehlager um eine Achse gedreht und in mehreren Drehstellungen gemessen werden, wobei diese Drehstellungen gleichverteilt oder unregelmäßig angeordnet sein können.

[0027] Beispielhafte Szenarien bei Durchführung der Mehrzahl von interferometrischen Messungen sind:

- Messen einer rotationssymmetrischen planen, asphärischen oder sphärischen Fläche auf einem Prüfplatz mit einem Drehlager, wobei die Subapertur mindestens vom Rand des Prüflings bis zur Mitte des Prüflings reicht und die Drehlagerachse mit einer Symmetriearchse des Prüflings i.W. übereinstimmt. Die Position des Prüflings kann hierbei durch Verfahren des Drehlagers variiert werden.
- Messen einer sphärischen Fläche auf einem Prüfplatz mit einer Halterung, die die Rotation der Sphäre um mehr als eine Achse erlaubt. In Verbindung mit iterativem Stitching kann auf diese Weise ein absolut-kalibrierendes Messverfahren realisiert werden.
- Abrastern einer Fläche (bei der es sich um eine plane Fläche, eine sphärische Fläche, eine asphärische Fläche oder eine Freiformfläche handeln kann) mit einer Vielzahl von Subaperturen, wobei das Raster regelmäßig oder unregelmäßig angeordnet sein kann. Auch hier kann mit dem erfindungsgemäßen iterativen Stitching ein absolut-kalibrierendes Verfahren realisiert werden.

[0028] Gemäß einer Ausführungsform ist das optische Element ein Spiegel oder eine Linse.

[0029] Gemäß einer Ausführungsform ist das optische Element ein optisches Element einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

[0030] Die Erfindung betrifft weitere eine Vorrichtung zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, wobei die Vorrichtung dazu ausgelegt ist, ein Verfahren mit den vorstehend beschriebenen Merkmalen durchzuführen. Zu Vorteilen und bevorzugten Ausgestaltungen der Vorrichtung wird auf die vorstehenden Ausführungen im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren Bezug genommen.

[0031] Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind der Beschreibung sowie den Unteransprüchen zu entnehmen.

[0032] Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den beigefügten Abbildungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

Figurenliste

[0033] Es zeigen:

Fig. 1 ein Flussdiagramm zur Erläuterung des Ablaufs eines Verfahrens gemäß einer beispielhaften Ausführungsform der Erfindung;

Fig. 2-3 schematische Darstellungen zur Erläuterung eines möglichen Aufbaus einer im Rahmen der Erfindung einsetzbaren interferometrischen Prüfanordnung; und

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer für den Betrieb im EUV ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0034] **Fig. 4** zeigt eine schematische Darstellung einer beispielhaften für den Betrieb im EUV ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage, welche mit einem erfindungsgemäßen Verfahren prüfbare Spiegel aufweist.

[0035] Gemäß **Fig. 4** weist eine Beleuchtungseinrichtung in einer für EUV ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage **410** einen Feldfacettenspiegel **403** und einen Pupillenfacettenspiegel **404** auf. Auf den Feldfacettenspiegel **403** wird das Licht einer Lichtquelleneinheit, welche eine Plasmalichtquelle **401** und einen Kollektorspiegel **402** umfasst, gelenkt. Im Lichtweg nach dem Pupillenfacettenspiegel **404** sind ein erster Teleskopspiegel **405** und ein zweiter Teleskopspiegel **406** angeordnet. Im Lichtweg nachfolgend ist ein Umlenkspiegel **407** angeordnet, der die auf ihn treffende Strahlung auf ein Objektfeld in der Objektebene eines sechs Spiegel **421-426** umfassenden Projektionsobjektivs lenkt. Am Ort des Objektfeldes ist eine reflektive strukturtragende Maske **431** auf einem Maskentisch **430** angeordnet, die mit Hilfe des Projektionsobjektivs in eine Bildebene abgebildet wird, in welcher sich ein mit einer lichtempfindlichen Schicht (Photoresist) beschichtetes Substrat **441** auf einem Wafertisch **440** befindet.

[0036] Bei dem im Rahmen der Erfindung hinsichtlich seiner Oberflächenform bzw. Passe untersuchten optischen Element kann es sich z.B. um einen beliebigen Spiegel der Projektionsbelichtungsanlage **410**, beispielsweise den (vergleichsweise großen) bildebenenseitig letzten Spiegel **426** des Projektionsobjektivs handeln. In weiteren Anwendungen kann es sich bei dem optischen Element auch um eine Linse z.B. einer für

den Betrieb im DUV (z.B. bei Wellenlängen kleiner als 250nm, insbesondere kleiner als 200nm) ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage handeln.

[0037] Im Weiteren wird das erfindungsgemäße Verfahren anhand einer Ausführungsform unter Bezugnahme auf das in **Fig. 1** dargestellte Flussdiagramm beschrieben.

[0038] Dabei wird davon ausgegangen, dass zur Charakterisierung der Passe eines Spiegels eine Mehrzahl von (z.B. fünfzig) Subaperturen in einzelnen interferometrischen Messungen mit jeweils unterschiedlicher Positionierung des Prüflings aufgenommen werden. Durch den Begriff „Subapertur“ soll insbesondere zum Ausdruck gebracht werden, dass die zur Aufnahme der Subaperturen durchgeführten interferometrischen Messungen jeweils nicht die komplette Oberfläche des Spiegels abdecken.

[0039] Hierbei wird im Ausführungsbeispiel von einem sphärischen Spiegel ausgegangen, wobei unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 2a** die dort angedeutete Variation der Position des Spiegels **201** derart erfolgt, dass jeweils der Krümmungsmittelpunkt an Ort und Stelle bleibt. In weiteren Ausführungsformen kann es sich bei dem Spiegel **201** auch um einen im Wesentlichen planen Spiegel handeln, welcher zwischen den einzelnen interferometrischen Messungen jeweils translatorisch in einer zur Spiegeloberfläche parallelen Richtung verschoben wird.

[0040] Des Weiteren kann in Ausführungsformen der Erfindung eine symmetriebrechende Anordnung der einzelnen Messpositionen gewählt werden. Dies hat den Vorteil, dass eine eindeutige Aufteilung der bei den einzelnen Subaperturmessungen erhaltenen Messergebnisse in Passeanteile und Referenzwellenanteile vorgenommen werden kann.

[0041] Um nun aus besagten gemessenen Subaperturen die gesamte bzw. „zusammengesetzte“ Passe des Spiegels zu ermitteln, geht die Erfindung von dem als solches bekannten „Stitching-Verfahren“ aus, welches jedoch - wie im Weiteren unter Bezugnahme auf das Flussdiagramm von **Fig. 1** beschrieben - abgewandelt wird.

[0042] Gemäß **Fig. 1** erfolgt nach dem Start (Schritt **S110**) des Verfahrens zunächst eine erstmalige Berechnung der Passe unter Vorgabe einer bestimmten Referenzwelle. Dabei kann für die Referenzwelle insbesondere ein extern bestimmt Startwert oder eine Null-Funktion vorgegeben werden. Diese erstmalige Berechnung der Passe umfasst insbesondere auch die bereits erwähnte Umrasterung bzw. Transformation vom Koordinatensystem des Messaufbaus auf das Koordinatensystem des Prüflings bzw. Spiegels **201**. Der Schritt des „Stitching“ der Passe bei gegebener Referenzwelle) ist in **Fig. 1** mit „S120“ bezeichnet und erfolgt durch Lösung des folgenden Minimierungsproblems (welches ein lineares Gleichungssystem ergibt):

$$\min_{f, P_n} \sum_{i=1}^m \int_{x,y} \left[w_{x,y}^{\text{PRF}} \cdot T_{i,x,y}^{\text{CCD} \rightarrow \text{PRF}}(w_i^S) \cdot \left(T_{i,x,y}^{\text{CCD} \rightarrow \text{PRF}}(S_i - I_{n-1}) - \sum_k f_{ik} F_{k,x,y} - P_{n,x,y} \right) \right]^2 dx dy \quad (1)$$

[0043] Dabei werden hier und im Weiteren folgende Abkürzungen bzw. Variablen verwendet:

- P_n : Iteration n der Passe des optischen Elements bzw. Prüflings
- I_n : Iteration n der Referenzwelle. I_0 ist entweder ein extern bestimmt Startwert oder eine Null-Funktion
- S_i : i-te Subapertur-Messung
- m : Anzahl der Subapertur-Messungen
- F_k : Kompensatoren/Sensitivitäten, deren Amplituden variiert werden sollen
- f_{ik} : Amplituden der Sensitivität k für Subapertur i
- w_i^S : Subapertur-Masken/Gewichtsfunktionen für Subapertur i.
- w^{PRF} : Passe-Maske/Gewichtsfunktion.
- $T_i^{\text{CCD} \rightarrow \text{PRF}}$: Funktion, die eine auf dem Messraster für die i-te Messung definierte Funktion auf das Prüflingsraster umrastert.

[0044] Im Unterschied zum herkömmlichen (nicht-iterativen) Verfahren erfolgt nun erfindungsgemäß basierend auf der erhaltenen Information über die Passe des optischen Elements bzw. Spiegels ein „Stitchen“ der Referenzwelle, was insbesondere eine Rücktransformation der Passe in das Koordinatensystem des Messaufbaus beinhaltet. Die hierbei erfolgende Rückwärtsrechnung unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Passe führt zu einer genaueren bzw. verbesserten Information über die Referenzwelle, wobei der entsprechende Schritt (d.h. ein „Stitchen“ der Referenzwelle bei gegebener Passe) in **Fig. 1** mit „**S140**“ bezeichnet ist.

[0045] Das „Stitchen“ der Referenzwelle I_n bei gegebener Passe P_n erfolgt durch Lösung des folgenden Minimierungsproblems (welches ebenfalls ein lineares Gleichungssystem ergibt):

$$\min_{f, P_n} \sum_{i=1}^m \int_{x,y} \left[w_{x,y}^{\text{PRF}} \cdot T_{i,x,y}^{\text{CCD} \rightarrow \text{PRF}}(w_i^S) \cdot \left(T_{i,x,y}^{\text{CCD} \rightarrow \text{PRF}}(S_i - I_n) - \sum_k f_{ik} F_{k,x,y} - P_{n,x,y} \right) \right]^2 dx dy \quad (2)$$

[0046] Das „Stitchen“ der Referenzwelle kann in Ausführungsformen (z.B. zur Beschränkung der Rechenzeit und/oder des Speicherbedarfs) auch unter Verwendung nur einer Teilanzahl bzw. Auswahl von Pixeln erfolgen.

[0047] Auf Basis der so erhaltenen verbesserten bzw. genaueren Information über die Referenzwelle erfolgt gemäß **Fig. 1** im nächsten Iterationsschritt eine erneute Vorwärtsrechnung entsprechend einem erneuten „Stitchen“ der Passe, etc.

[0048] Bei den Subapertur-Masken/Gewichtsfunktionen bzw. den Passe-Maske/Gewichtsfunktionen kann es sich in Ausführungsformen der Erfindung um Maskenfunktionen (Funktionswerte **0** oder **1**) handeln, welche gültige Bereiche von ungültigen Bereichen in jeder Messung trennen. In weiteren Ausführungsformen kann es sich bei den Subapertur-Masken/Gewichtsfunktionen bzw. den Passe-Maske/Gewichtsfunktion auch um „echte“ Gewichtsfunktionen (Funktionswert ≥ 0) handeln, die aus lokalen Messfehlern berechnet werden.

[0049] In Ausführungsformen der Erfindung kann für Bildbereiche mit vergleichsweise großem Messfehler ein relativ kleineres Gewicht oder sogar Null-Gewicht verwendet werden. Des Weiteren können die Gewichte dynamisch im Laufe des iterativen Verfahrens verfeinert werden.

[0050] Die Anzahl der Messpositionen kann grundsätzlich beliebig geeignet gewählt werden, wobei die Anzahl wenigstens zwei beträgt.

[0051] Anstelle der Minimierung der Abweichung des Modells von den realen Messungen kann auch in analoger Weise die Differenz zweier Messungen im Überlappungsbereich minimiert werden. Ein solches Vorgehen liefert ähnliche Lösungen und unterscheidet sich nur in der Wahl der Gewichte w_i^S .

[0052] Die Umrasterungsfunktion T kann in Abhängigkeit von den konkreten Gegebenheiten insbesondere hinsichtlich des Prüflings gewählt (d.h. an das konkrete Stitching-Problem angepasst) werden. Dabei kann insbesondere ein Umrastern auf ein kartesisches Raster auf dem Prüfling erfolgen.

Das auf dem Prüfling aufgespannte Pixelraster, welches beim „Stitching“ der Passe verwendet wird, kann sowohl hinsichtlich der Gesamtpixelanzahl als auch hinsichtlich der Verzeichnung des Rasters variiert werden.

[0053] Im Ausführungsbeispiel von **Fig. 1** endet (im Schritt **S150**) dieses iterative Verfahren, sobald gemäß Abfrage im Schritt **S130** ein vorgegebenes Konvergenzkriterium erreicht ist. In weiteren Ausführungsformen kann auch von vorneherein eine vorgegebene Anzahl von Iterationsschritten festgelegt werden, nach deren Erreichen die Iteration angebrochen und die zuletzt ermittelte Passe ausgegeben wird.

[0054] Wenn die Erfindung auch anhand spezieller Ausführungsformen beschrieben wurde, erschließen sich für den Fachmann zahlreiche Variationen und alternative Ausführungsformen, z.B. durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen. Dementsprechend versteht es sich für den Fachmann, dass derartige Variationen und alternative Ausführungsformen von der vorliegenden Erfindung mit umfasst sind und die Reichweite der Erfindung nur im Sinne der beigefügten Patentansprüche und deren Äquivalente beschränkt ist.

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.

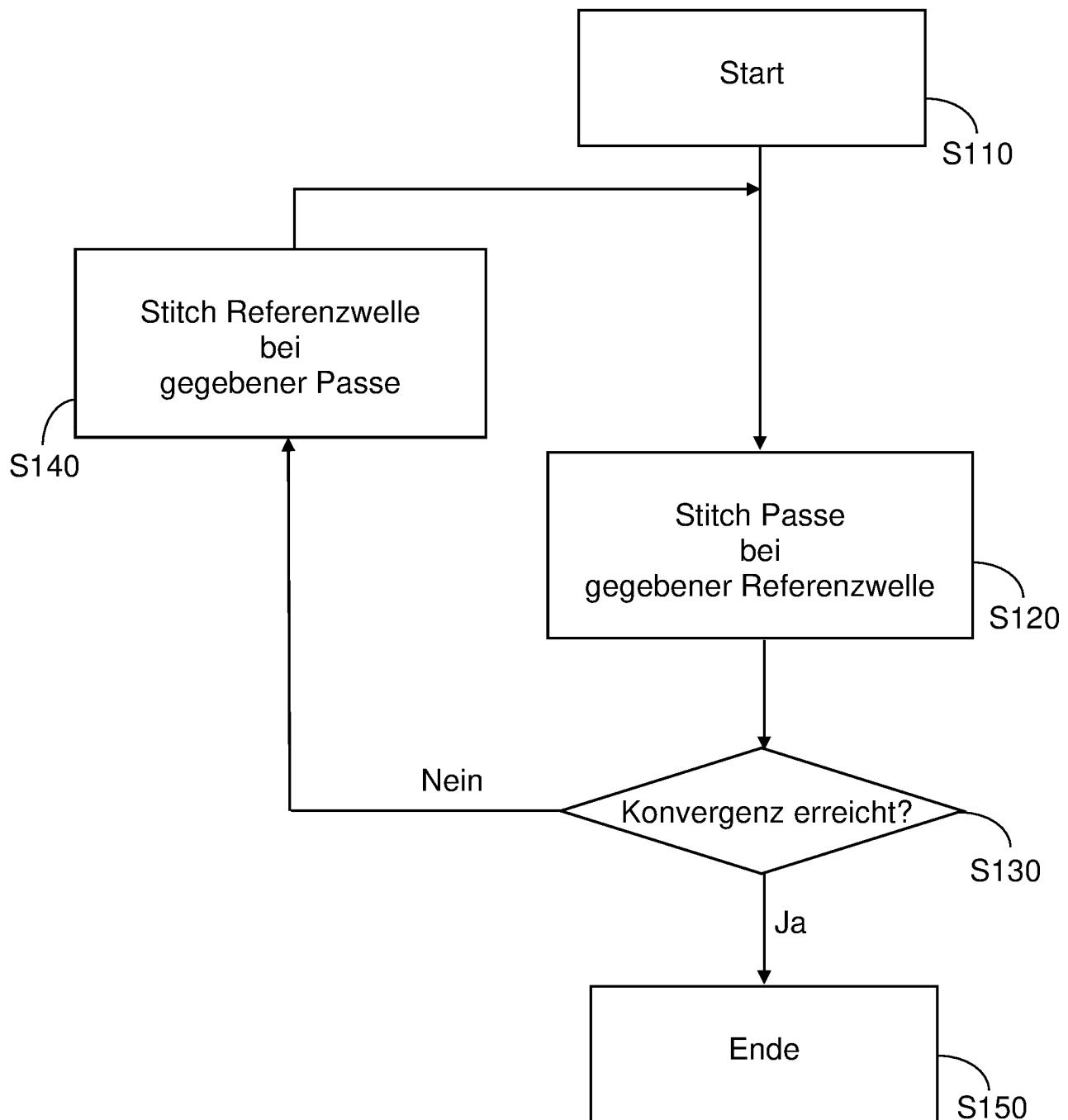
Zitierte Patentliteratur

- US 2016/0085061 A1 [0003]
- US 6956657 B2 [0008]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:
 - Durchführen einer Mehrzahl von interferometrischen Messungen, bei welchen jeweils ein Interferogramm zwischen einer von jeweils einem Abschnitt des optischen Elements ausgehenden Prüfwelle und einer Referenzwelle aufgenommen wird, wobei zwischen diesen Messungen die Position des optischen Elements relativ zur Prüfwelle verändert wird; und
 - Berechnen der Passe des optischen Elements auf Basis dieser Messungen;
 - wobei dieses Berechnen iterativ in solcher Weise erfolgt, 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 vorangegangen Iterationsschrittes angepasste Referenzwelle zugrundegelegt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Durchführung der interferometrischen Messungen eine Aufnahme von Subaperturen umfasst, welche jeweils nicht die komplette Oberfläche des Spiegels abdecken.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die jeweils angepasste Referenzwelle unter Durchführung einer Rückwärtsrechnung ermittelt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Durchführung der Rückwärtsrechnung ein Herausrechnen der Passe aus den jeweiligen Messdaten umfasst.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Durchführung der Vorwärtsrechnung jeweils eine Umrasterung bzw. Transformation von einem ersten Koordinatensystem eines bei der Durchführung der interferometrischen Messungen verwendeten Messaufbaus auf ein zweites Koordinatensystem des optischen Elements umfasst.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Durchführung der Rückwärtsrechnung jeweils eine Umrasterung bzw. Transformation von einem zweiten Koordinatensystem des optischen Elements auf ein erstes Koordinatensystem eines bei der Durchführung der interferometrischen Messungen verwendeten Messaufbaus umfasst.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das iterative Berechnen bis zur Erfüllung eines vorgegebenen Konvergenzkriteriums durchgeführt wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das iterative Berechnen für eine vorgegebene Anzahl von Iterationsschritten durchgeführt wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Veränderung der Position des optischen Elements derart erfolgt, dass ein Krümmungsmittelpunkt des optischen Elements an Ort und Stelle bleibt.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Element ein Spiegel oder eine Linse ist.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Element ein optisches Element einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage ist.
12. Vorrichtung zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung dazu ausgelegt ist, ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchzuführen.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Fig. 1

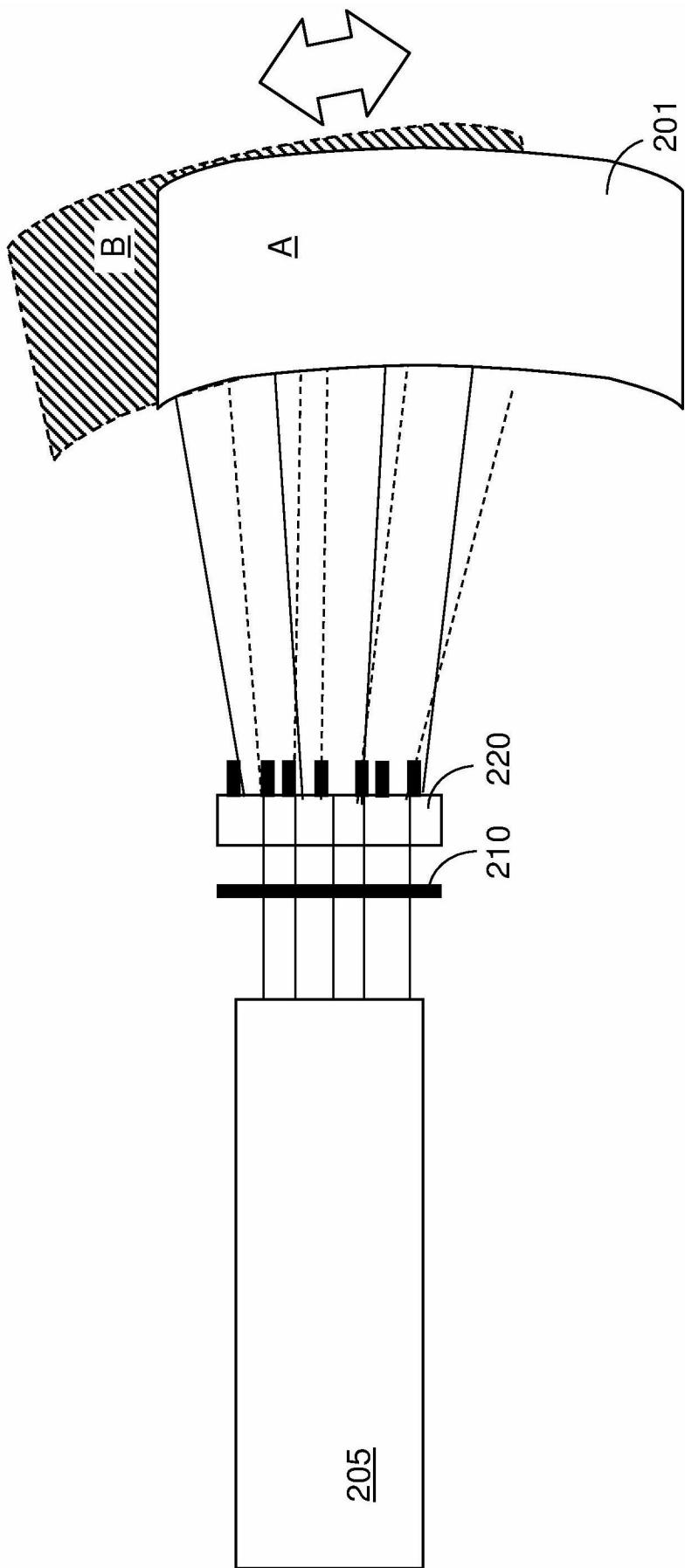


Fig. 2a

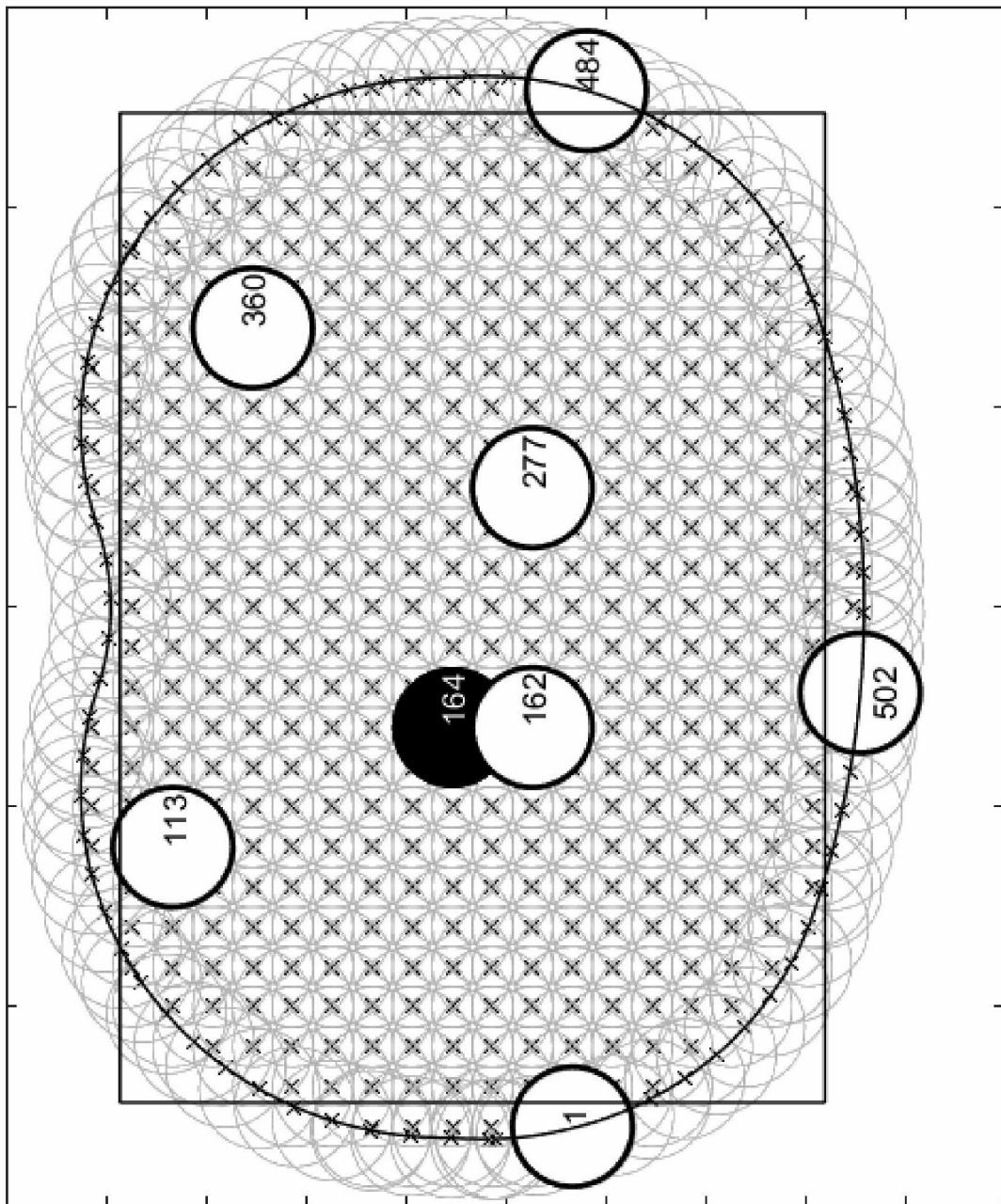
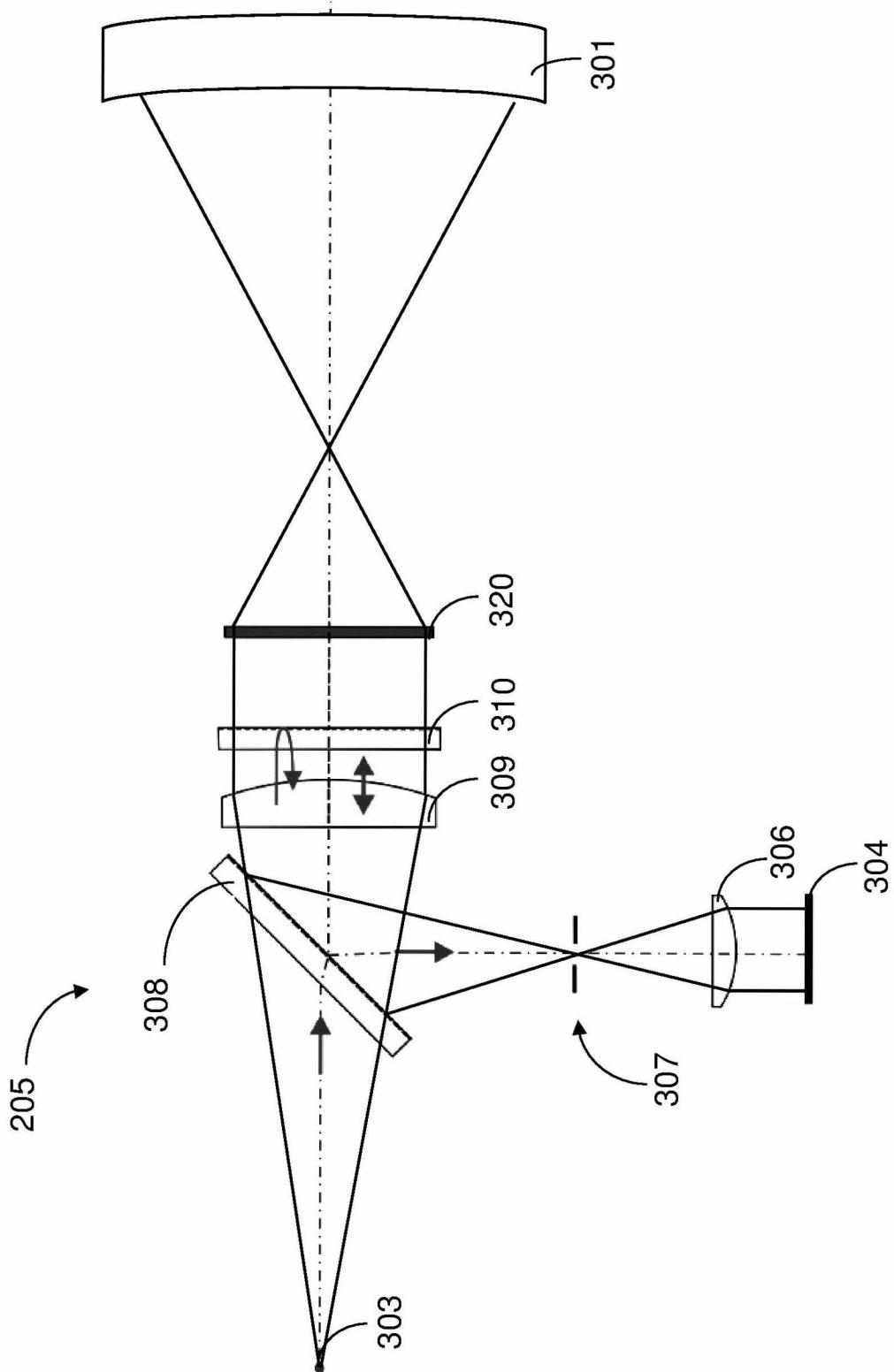


Fig. 2b

Fig. 3

Stand der Technik



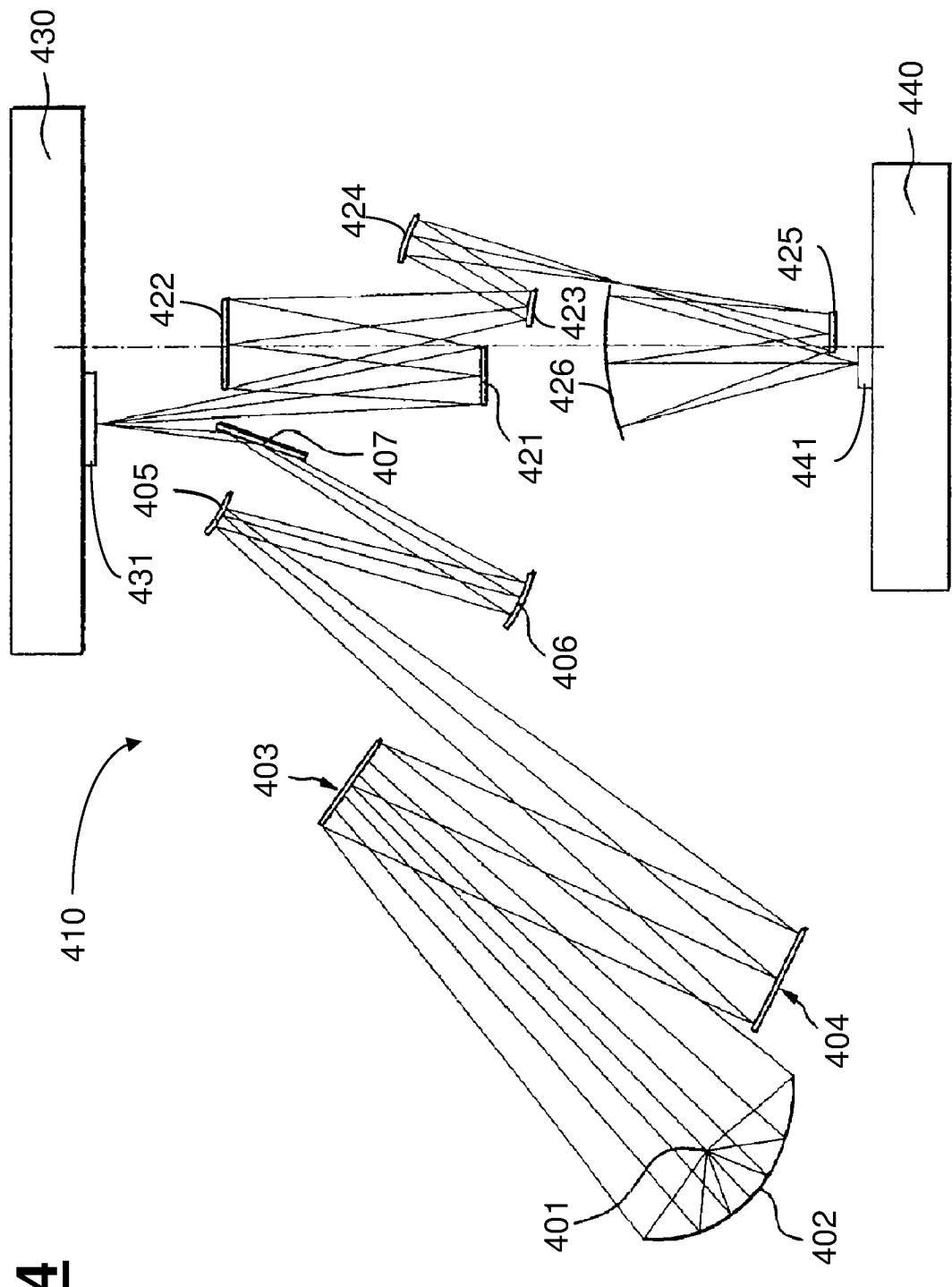


Fig. 4