

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
04. April 2019 (04.04.2019)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2019/063247 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01B 9/02 (2006.01) G01M 11/02 (2006.01)
G01B 11/24 (2006.01) G03F 7/20 (2006.01)
G01M 11/00 (2006.01) G06T 7/55 (2017.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2018/073703

(22) Internationales Anmeldedatum:
04. September 2018 (04.09.2018)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2017 217 371.8
29. September 2017 (29.09.2017) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): CARL ZEISS SMT GMBH [DE/DE]; Rudolf-Eber-
Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder; und

(71) Anmelder (nur für US): RIEPENHAUSEN, Frank
[DE/DE]; Dives-sur-Mer Str. 13, 73447 Oberkochen (DE).
SCHRÖTER, Martin [DE/DE]; Primelweg 3, 73447
Oberkochen (DE).

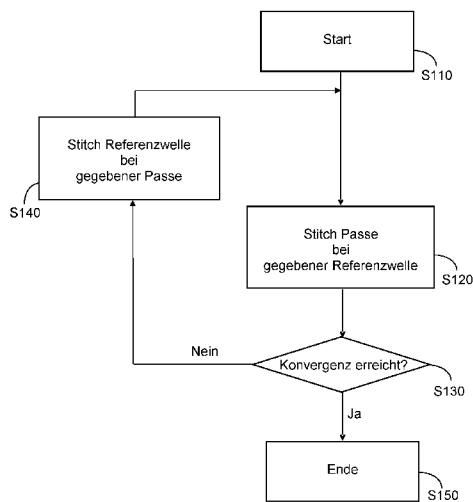
(74) Anwalt: FRANK, Hartmut; BONSMANN · BONSMANN · FRANK Patentanwälte, Reichspräsidentenstraße
21-25, 45470 Mülheim a.d. Ruhr (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR CHARACTERISING THE SURFACE SHAPE OF AN OPTICAL ELEMENT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR CHARAKTERISIERUNG DER OBERFLÄCHENFORM EINES
OPTISCHEN ELEMENTS

Fig. 1



S110 Start
S120 Stitching deviation with given reference wave
S130 Convergence achieved?
S140 Stitching reference wave with given deviation
S150 End
Ja = Yes
Nein = No

(57) Abstract: The invention relates to a method and a device for characterising the surface shape of an optical element, in particular a mirror or a lens of a micro-lithographic projection exposure system. A method according to the invention comprises the following steps: carrying out a plurality of interferometric measurements, in which a respective interferogram is recorded between a test wave coming from a respective section of the optical element and a reference wave, wherein the position of the optical element is altered relative to the test wave between these measurements; and calculating the deviation from the target shape of an optical element on the basis of these measurements, wherein this calculation occurs iteratively in such a way that, in a plurality of iteration steps, the deviation from the target shape of the optical element is determined by carrying out a forward calculation, wherein each of these iteration steps is based on a respective reference wave adjusted on the basis of the preceding iteration step.

(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 Vorwärtsrechnung ermittelt wird, wobei jedem dieser Iterationsschritte jeweils eine auf Basis des vorangegangenen Iterationsschrittes angepasste Referenzwelle zugrundegelegt wird.

SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (*soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Veröffentlicht:

- *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Verfahren und Vorrichtung zur Charakterisierung
der Oberflächenform eines optischen Elements

5

10

Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der Deutschen Patentanmeldung DE 10 2017 217 371.8, angemeldet am 29. September 2017. Der Inhalt dieser DE-Anmeldung wird durch Bezugnahme („incorporation by reference“) mit in den vorliegenden Anmeldungstext aufgenommen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

15

Gebiet der Erfindung

20

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

25

30

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.

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.

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.

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 aufgenom-

men. 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.

5

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

10

15

20

25

30

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.

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

5

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

10

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.

15

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

20

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

25

- 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.

30

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.

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.

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.

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 erfor-

dert. 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 um-
5 gekehrter 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.

10 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 Mehr-
15 zahl 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 er-
reicht, dass bei dem erfindungsgemäßen Verfahren das eingangs beschriebene, im Weiteren noch detaillierter erläuterte „Stitching“ nicht nur bei der Be-
20 stimmung der Passe des Prüflings, sondern auch bei der in den einzelnen Iterationsschritten erfolgenden Rekonstruktion der Referenzwelle Anwendung findet.

Die Wahl der Start-Referenzwelle kann grundsätzlich in beliebiger geeigneter
25 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-
30 Referenzwelle gewählt werden.

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

- 5 Gemäß einer Ausführungsform wird die jeweils angepasste Referenzwelle unter Durchführung einer Rückwärtsrechnung ermittelt.

Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Durchführung der Rückwärtsrechnung ein Herausrechnen der Pässe aus den jeweiligen Messdaten.

10

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

15

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

20

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

25

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

30

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

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.

5

Beispielhafte Szenarien bei Durchführung der Mehrzahl von interferometrischen Messungen sind:

10

- 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 Symmetrieachse des Prüflings i.W. übereinstimmt. Die Position des Prüflings kann hierbei durch Verfahren des Drehlagers variiert werden.

15

- Messen einer sphärischen Fläche auf einem Prüfplatz mit einer Halterung, die die Rotation der Kugel um mehr als eine Achse erlaubt. In Verbindung mit iterativem Stitching kann auf diese Weise ein absolut-kalibrierendes Messverfahren realisiert werden.

20

- 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.

25

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

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

30

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.

5

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

10

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

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

15

Es zeigen:

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

20

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

25

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

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

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

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.

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.

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

5 Dabei wird davon ausgegangen, dass zur Charakterisierung der Pässe 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
10 durchgeführten interferometrischen Messungen jeweils nicht die komplette Oberfläche des Spiegels abdecken.

Hierbei wird im Ausführungsbeispiel von einem sphärischen Spiegel ausgegangen, wobei unter erneuter Bezugnahme auf Fig. 2a die dort angedeutete
15 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 Spiegelfläche parallelen Richtung
20 verschoben wird.

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 Pässeanteile und Referenzwellenanteile vorgenommen werden kann.
25

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

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 bestimmter 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):

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

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 bestimmter 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.

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.

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

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

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.

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.

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 Be-

reiche 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.

5

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.

10

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

15

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 .

20

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.

25

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.

30

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 vorneher ein eine vorgegebene Anzahl von Iterationsschritten festgelegt werden, nach deren Erreichen die Iteration angebrochen und die zuletzt ermittelte Passe ausgegeben wird.

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.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:
 - 5 • 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
 - 10 • 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
15 jedem dieser Iterationsschritte jeweils eine auf Basis des vorangegangenen Iterationsschrittes angepasste Referenzwelle zugrundegelegt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Durchführung der interferometrischen Messungen eine Aufnahme von Subaperturen
20 umfasst, welche jeweils nicht die komplette Oberfläche des Spiegels abdecken.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die
25 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
30 Passe aus den jeweiligen Messdaten umfasst.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekenn-

zeichnet, dass die Durchführung der Vorwärtsrechnung jeweils eine Umra-
sterung 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 gekenn-
zeichnet, dass die Durchführung der Rückwärtsrechnung jeweils eine Um-
rasterung bzw. Transformation von einem zweiten Koordinatensystem des
optischen Elements auf ein erstes Koordinatensystem eines bei der Durch-
führung der interferometrischen Messungen verwendeten Messaufbaus um-
fasst.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekenn-
zeichnet, dass das iterative Berechnen bis zur Erfüllung eines vorgegeben-
en Konvergenzkriteriums durchgeführt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekenn-
zeichnet, dass das iterative Berechnen für eine vorgegebene Anzahl von
Iterationsschritten durchgeführt wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekenn-
zeichnet, 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 gekenn-
zeichnet, dass das optische Element ein Spiegel oder eine Linse ist.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekenn-
zeichnet, dass das optische Element ein optisches Element einer mikro-
lithographischen 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.

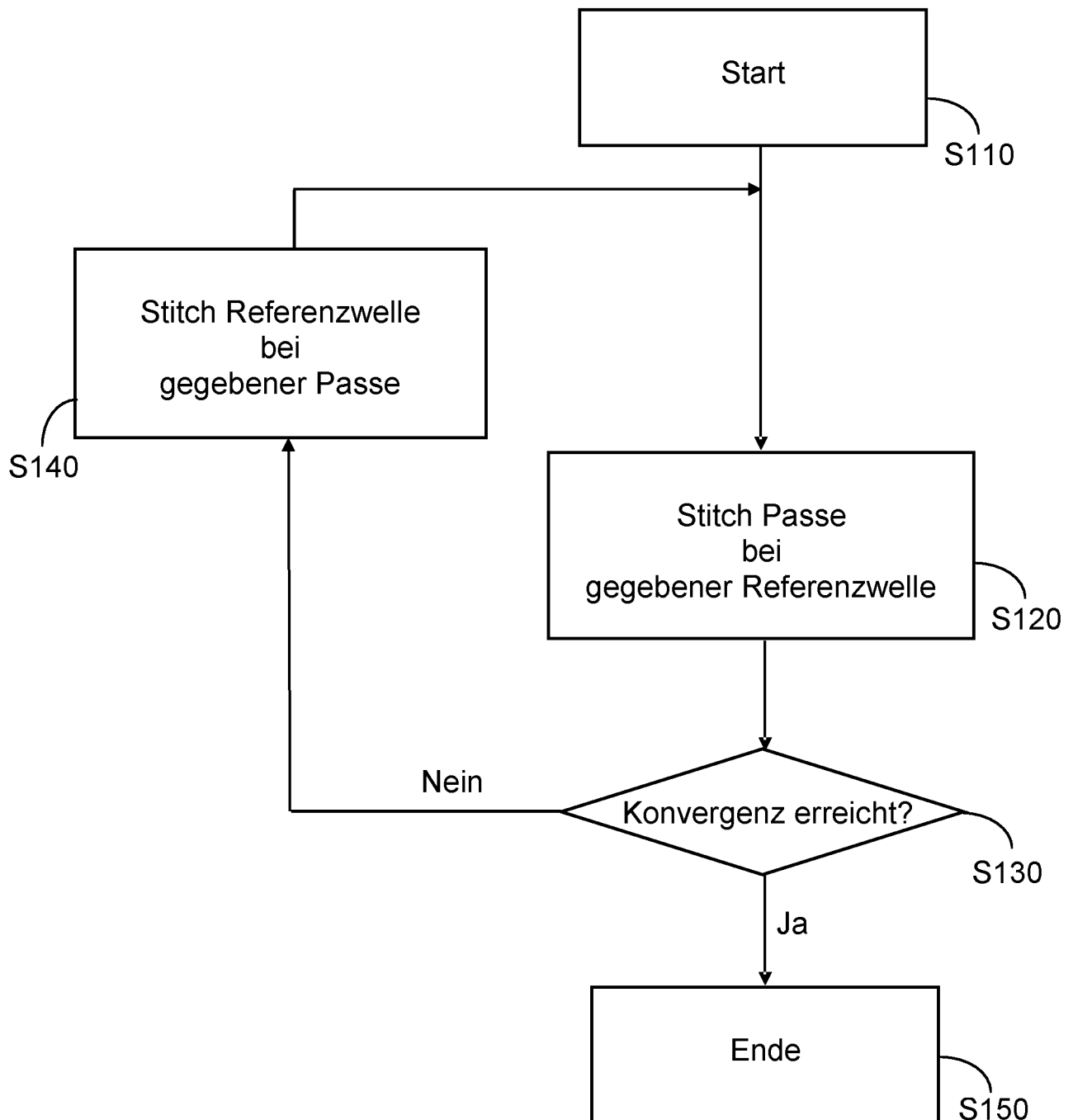
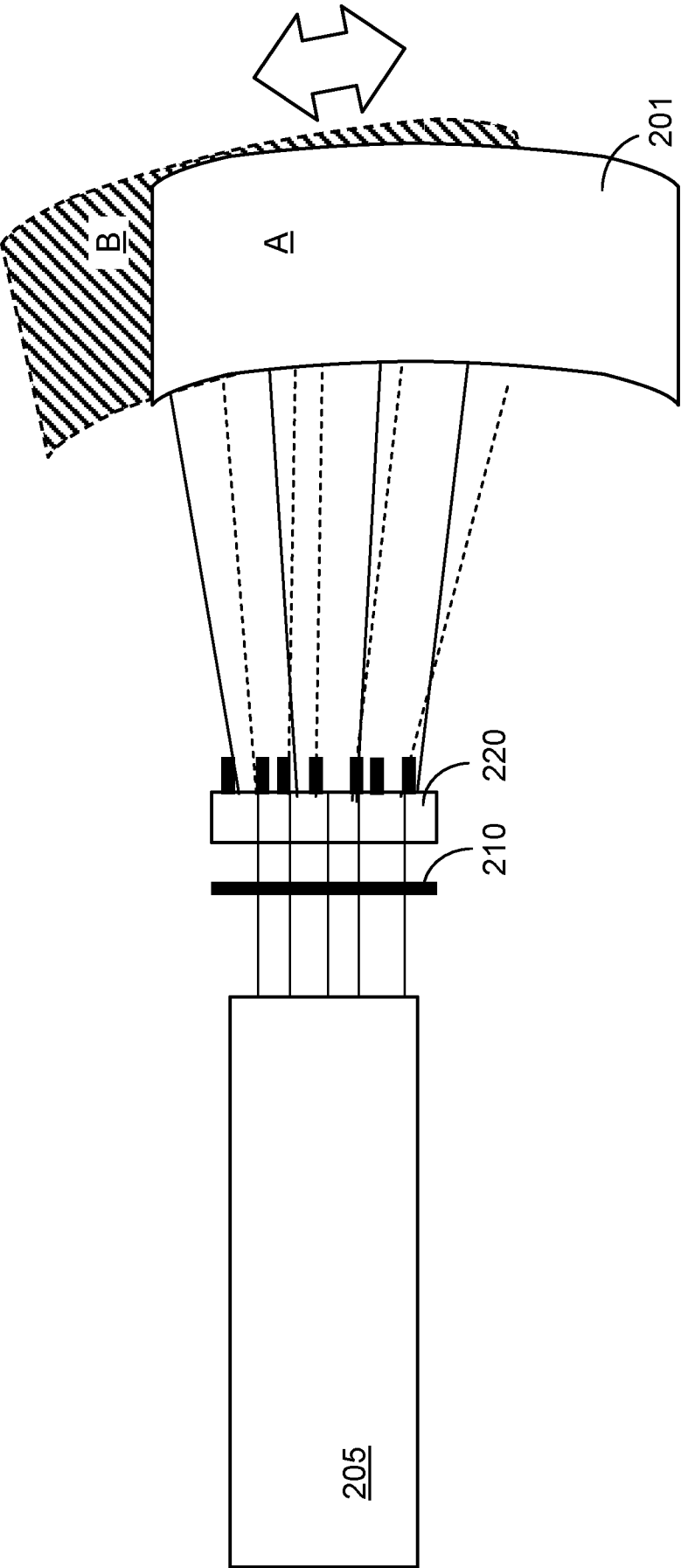
Fig. 1

Fig. 2a



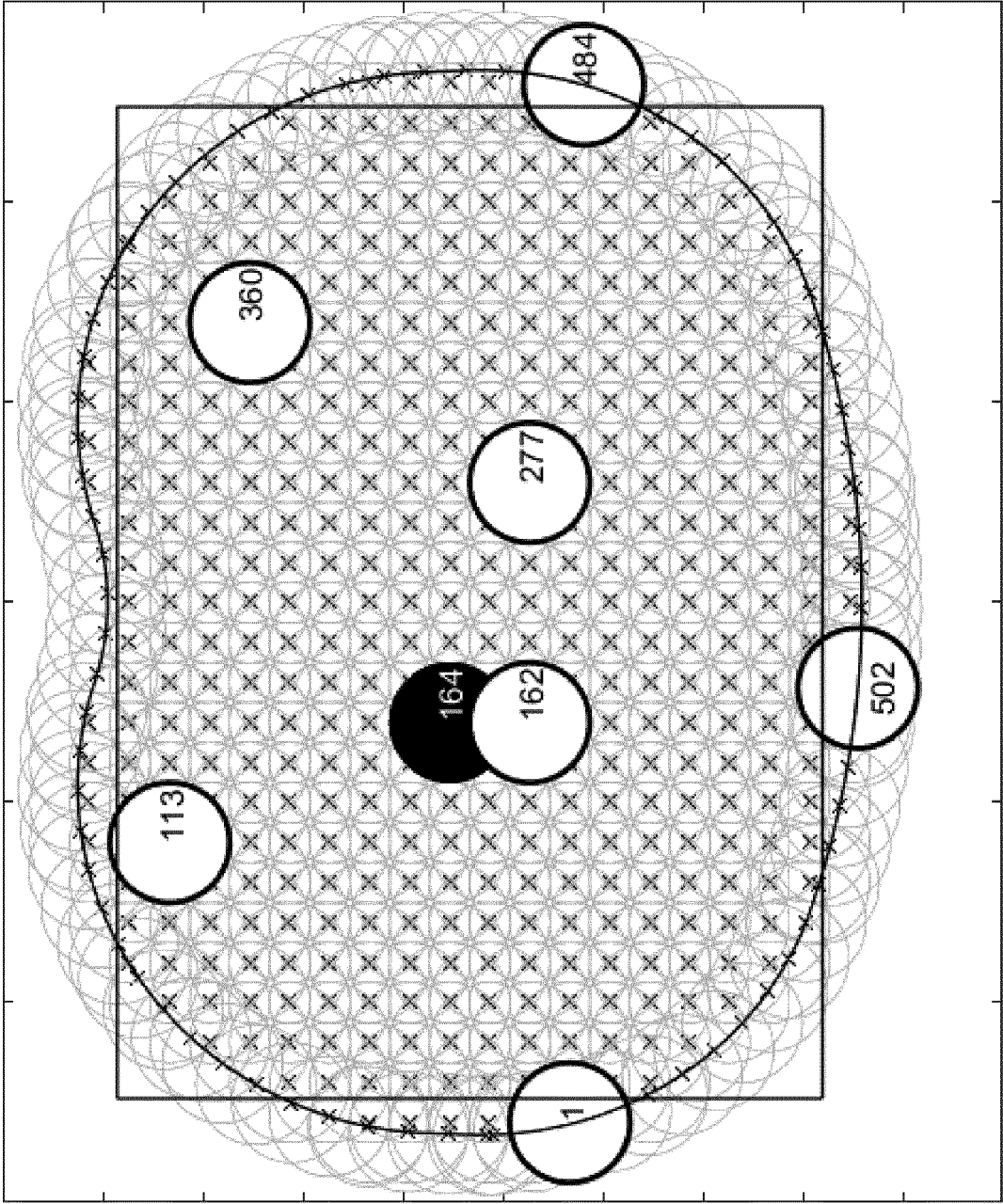
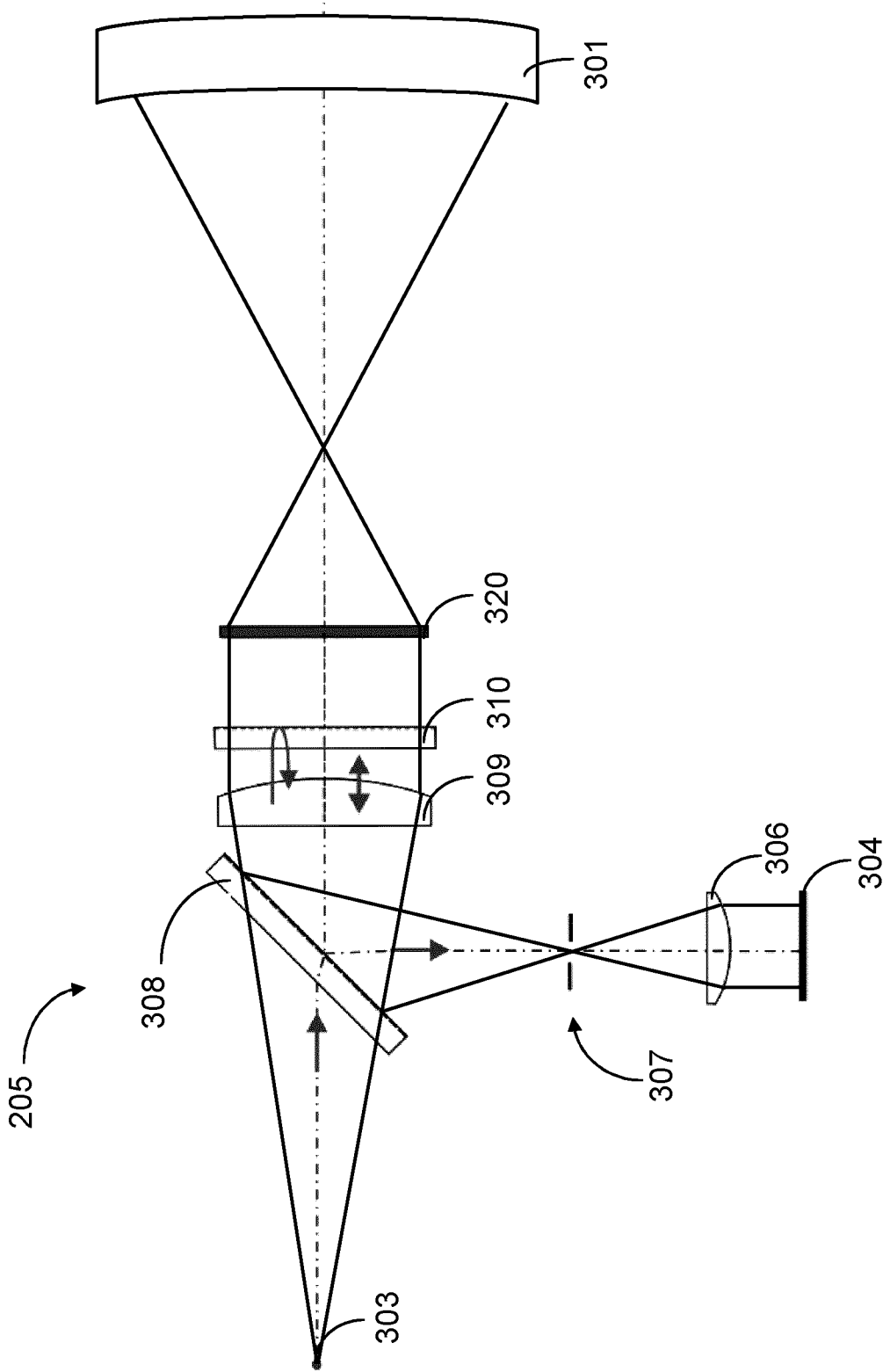


Fig. 2b

Fig. 3

Stand der Technik



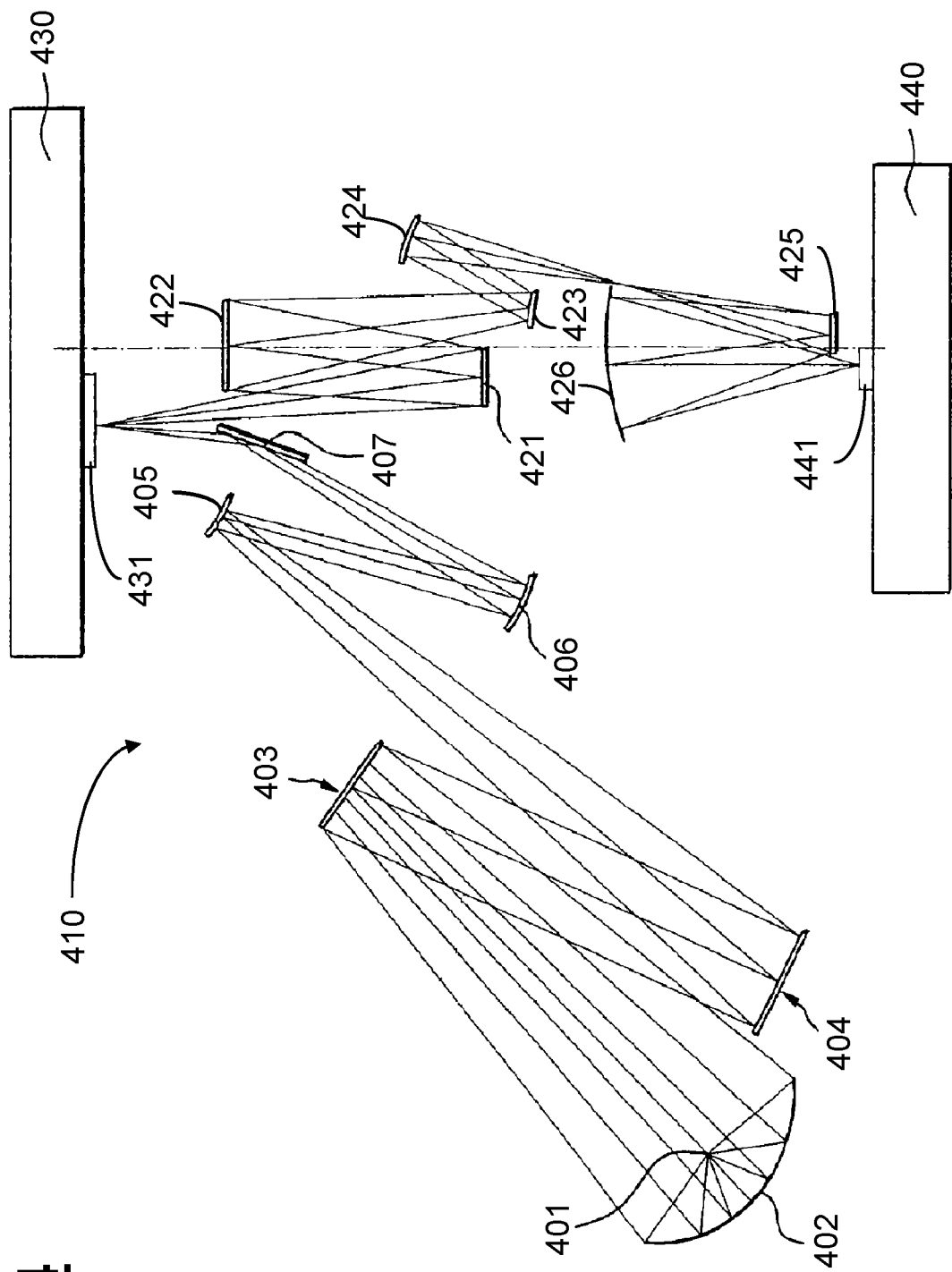


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2018/073703**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G01B 9/02(2006.01)i; **G01B 11/24**(2006.01)i; **G01M 11/00**(2006.01)i; **G01M 11/02**(2006.01)i; **G03F 7/20**(2006.01)i;
G06T 7/55(2017.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01B; G01M; G03F; G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JON FLEIG ET AL. "An automated subaperture stitching interferometer workstation for spherical and aspherical surfaces" <i>PROCEEDINGS OF SPIE</i> , US, Vol. 5188, 07 November 2003 (2003-11-07), pages 296-307 DOI: 10.1117/12.506254 ISBN: 978-1-5106-1533-5. XP055280638 the whole document	1-12
X	US 2003117632 A1 (GOLINI DONALD [US] ET AL) 26 June 2003 (2003-06-26) cited in the application the whole document	1-12
A	US 2011119011 A1 (YAMAZOE KENJI [JP]) 19 May 2011 (2011-05-19) the whole document	1-12
A	US 2009251702 A1 (MURPHY PAUL [US] ET AL) 08 October 2009 (2009-10-08) the whole document	1-12



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 November 2018

Date of mailing of the international search report

23 November 2018

Name and mailing address of the ISA/EP

**European Patent Office
 p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
 Netherlands**

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Stanciu, C

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2018/073703

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2003117632	A1	26 June 2003	AT	321992	T	15 April 2006
				DE	60210195	T2	04 January 2007
				EP	1324006	A1	02 July 2003
				JP	4498672	B2	07 July 2010
				JP	2004125768	A	22 April 2004
				US	2003117632	A1	26 June 2003
US	2011119011	A1	19 May 2011	CN	102713507	A	03 October 2012
				DE	112009005390	T5	13 September 2012
				JP	5597205	B2	01 October 2014
				JP	WO2011061843	A1	04 April 2013
				KR	20120091352	A	17 August 2012
				US	2011119011	A1	19 May 2011
US	2009251702	A1	08 October 2009	WO	2011061843	A1	26 May 2011
				CN	102047072	A	04 May 2011
				EP	2286179	A2	23 February 2011
				JP	5783899	B2	24 September 2015
				JP	2011518322	A	23 June 2011
				KR	20100134712	A	23 December 2010
US	2009251702	A1	08 October 2009	US	2009251702	A1	08 October 2009
				WO	2009126269	A2	15 October 2009

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES		
INV.	G01B9/02 G06T7/55	G01B11/24 G01M11/00 G01M11/02 G03F7/20
ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G01B G01M G03F G06T		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	JON FLEIG ET AL: "An automated subaperture stitching interferometer workstation for spherical and aspherical surfaces", PROCEEDINGS OF SPIE, Bd. 5188, 7. November 2003 (2003-11-07), Seiten 296-307, XP55280638, US DOI: 10.1117/12.506254 ISBN: 978-1-5106-1533-5 das ganze Dokument	1-12
X	US 2003/117632 A1 (GOLINI DONALD [US] ET AL) 26. Juni 2003 (2003-06-26) in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument ----- -/-	1-12
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 15. November 2018		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 23/11/2018
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Stanciu, C

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 2011/119011 A1 (YAMAZOE KENJI [JP]) 19. Mai 2011 (2011-05-19) das ganze Dokument -----	1-12
A	US 2009/251702 A1 (MURPHY PAUL [US] ET AL) 8. Oktober 2009 (2009-10-08) das ganze Dokument -----	1-12

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2018/073703

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 2003117632	A1	26-06-2003	AT	321992 T	15-04-2006
			DE	60210195 T2	04-01-2007
			EP	1324006 A1	02-07-2003
			JP	4498672 B2	07-07-2010
			JP	2004125768 A	22-04-2004
			US	2003117632 A1	26-06-2003

US 2011119011	A1	19-05-2011	CN	102713507 A	03-10-2012
			DE	112009005390 T5	13-09-2012
			JP	5597205 B2	01-10-2014
			JP	W02011061843 A1	04-04-2013
			KR	20120091352 A	17-08-2012
			US	2011119011 A1	19-05-2011

US 2009251702	A1	08-10-2009	CN	102047072 A	04-05-2011
			EP	2286179 A2	23-02-2011
			JP	5783899 B2	24-09-2015
			JP	2011518322 A	23-06-2011
			KR	20100134712 A	23-12-2010
			US	2009251702 A1	08-10-2009

